

CEPAL

@LIS



EUROPEAID
OFICINA DE COOPERACIÓN

M
MAYOL
EDICIONES

¿Quo vadis, tecnología de la información y de las comunicaciones?

Martin Hilbert
Osvaldo Cairó
Editores

¿QUO VADIS, TECNOLOGÍA
DE LA INFORMACIÓN
Y DE LAS COMUNICACIONES?

CONCEPTOS FUNDAMENTALES, TRAYECTORIAS
TECNOLÓGICAS Y EL ESTADO DEL ARTE
DE LOS SISTEMAS DIGITALES

MARTIN HILBERT
OSVALDO CAIRÓ

Editores





COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE
ECONOMIC COMMISSION FOR LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN
WWW. ECLAC.CL



www.mayolediciones.com

¿Quo vadis, tecnología de la información y de las comunicaciones? Conceptos fundamentales, trayectorias tecnológicas y el estado del arte de los sistemas digitales

Coautores (en orden alfabético):

Oswaldo Cairó (Dpto. Académico de Computación, ITAM, México), Rodolfo Cartas (Dpto. Académico de Sistemas Digitales, ITAM, México), Raúl Esquivel (Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México), Miguel González (Dpto. de Ingeniería Eléctrica Universidad de Chile, Chile), Silvia Guardati (Dpto. Académico de Computación, ITAM, México), Martin Hilbert (Programa Sociedad de la Información, División de Desarrollo Productivo y Empresarial, CEPAL, Naciones Unidas), José Incera (Dpto. Académico de Sistemas Digitales, ITAM, México), Javier Juárez (Comisión Federal de Telecomunicaciones, México), Ángel Kuri (Dpto. Académico de Computación ITAM, México), Omar de León (Teleconsult, Uruguay), Ing. Priscila López (Dpto. de Ingeniería Eléctrica Universidad de Chile, Chile), Edmundo Lozoya (Dpto. de Ingeniería Genética, CINVESTAV-Irapuato, México), Cristian Monges (Dpto. de Ingeniería Eléctrica Universidad de Chile, Chile), Guillermo Morales-Luna (Dpto. de Computación del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, CINVESTAV, México), Cristian Vásquez (Dpto. de Ingeniería Eléctrica Universidad de Chile, Chile).

Martin Hilbert tuvo a su cargo la edición y coordinación de este libro. Oswaldo Cairó coordinó la preparación de la parte III. Ambos desean agradecer el apoyo de Verónica Galaz, Néstor Becerra, Christian Nicolai, Nelson Correa, Jorge Katz, y especialmente el apoyo financiero de la Fundación Telefónica y del proyecto @LIS de la Comisión Europea.

Las opiniones expresadas en este documento son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de las organizaciones involucradas. Tampoco reflejan las opiniones oficiales de la Unión Europea y de la Fundación Telefónica.

Primera edición: febrero de 2009

Copyright © Naciones Unidas 2008

© Cepal en coedición con Mayol Ediciones S.A., 2008

ISBN 978-958-8307-58-9

Diseño de cubierta: Juan Carlos Durán

Coordinación editorial: María Teresa Barajas S.

Edición y diagramación: Mayol Ediciones S.A.

Impreso y hecho en Colombia - Printed and made in Colombia

CONTENIDO

PRÓLOGO	xi
INTRODUCCIÓN	xiii
RESUMEN	xvii
Primera parte	
EL PARADIGMA DIGITAL	1
1. La reciente onda larga de desarrollo humano	3
<i>Martin Hilbert</i>	
a. Schumpeter y sus discípulos	5
b. La naturaleza y el entrelazado de las ondas dentro de otras ondas	6
c. Paradigmas científicos y tecnológicos	9
2. Del dígito binario a la convergencia tecnológica	12
<i>Martin Hilbert</i>	
a. El <i>bit</i> como paradigma científico de la era digital	12
b. Captación y adaptación de información	15
c. Transmisión de información	17
d. Procesamiento de información	21
e. Almacenamiento de información	28
f. Convergencia de las TIC en las cuatro operaciones informáticas	31
3. La información, el conocimiento y las TIC	33
<i>Martin Hilbert</i>	
a. Datos, significado e información	34
b. De la información al conocimiento	40
c. Diferentes tipos de conocimiento y el traslado de la inteligencia	44
d. Cerebros y computadoras	47
e. Conclusiones sobre las sociedades de la información y del conocimiento	53
Segunda parte	
TRAYECTORIAS TECNOLÓGICAS DE LAS TIC	57
4. Teoría del progreso técnico	59
<i>Martin Hilbert</i>	
a. Búsqueda de respuestas para preguntas pendientes y de soluciones necesarias	59

b. Trayectorias tecnológicas	63
c. Medición del progreso técnico	65
5. Evolución en la captación y la interoperación	68
<i>Martin Hilbert, Priscila López y Cristian Vásquez</i>	
a. Capacidad de recibir información transmitida en el mundo	69
b. Capacidad de computación en el mundo	73
c. Capacidad de almacenamiento de información en el mundo	74
d. Conclusiones sobre la capacidad de capturar e interoperar información	75
6. Evolución en la transmisión	77
<i>Miguel González y Martin Hilbert</i>	
a. Paradigmas de transmisión de información	78
1. Paradigma de transmisión de codificación directa	79
2. Paradigma de código multisimbólico	82
3. Paradigma de código continuo	84
4. Paradigma de código binario	86
b. Conclusiones	88
7. Evolución en la capacidad de procesamiento	90
<i>Cristian Monges</i>	
a. Paradigmas en el procesamiento de información	91
b. Indicadores del rendimiento	94
c. Consumo de energía	97
d. Conclusiones	98
8. Evolución en el almacenamiento	99
<i>Cristian Vásquez y Martin Hilbert</i>	
a. Capacidad de almacenamiento por espacio	101
b. Costos de tecnologías de almacenamiento	105
c. Velocidad de acceso al almacenamiento	106
d. Conclusiones	107
9. Conclusiones y proyecciones sobre las trayectorias futuras de las TIC	109
<i>Martin Hilbert</i>	
Tercera parte	
EL ESTADO DEL ARTE DE LAS TIC	115
10. Más allá del paradigma digital: el paradigma de la nano y biotecnología	117
<i>Oswaldo Cairó</i>	
a. Nanotecnología	118
1. Comportamiento de la materia a nanoescala	120
2. Aplicaciones de la nanotecnología para las TIC	123

b. Biotecnología y bioinformática	127
<i>Ángel Kuri y Osvaldo Cairó</i>	
1. Bioinformática y biotecnología	128
2. La información en términos biológicos y químicos	131
3. Aplicaciones de la bioinformática y la biotecnología en las TIC	133
c. Conclusiones	135
11. Captación e interoperación de información	137
<i>José Incera, Osvaldo Cairó y Raúl Esquivel</i>	
a. Sensores	138
1. Materiales inteligentes	139
2. Sensores térmicos	140
3. Sensores electromagnéticos	144
4. Sensores mecánicos	146
5. Sensores nucleares	147
6. Sensores químicos y biosensores	147
b. Interfaces	151
1. Despliegue de información	154
2. Teclado y pantallas táctiles	157
3. Voz y diálogo	158
4. Reconocimiento humano	159
5. Interfaces hápticas	160
6. Interfaces cerebro-computadora (ICC)	161
c. Nuevos conceptos: computación ubicua, adaptrónica, realidad virtual y otros	166
1. Redes de sensores	166
2. Cómputo ubicuo	169
3. Computadoras para vestir	171
4. Internet de las cosas	172
5. Adaptrónica	173
6. Cognición aumentada	174
7. Conciencia sobre el contexto	175
8. Realidad virtual	176
9. Realidad aumentada	177
d. Conclusiones	178
12. Transmisión de información	181
<i>José Incera, Rodolfo Cartas y Osvaldo Carió</i>	
a. Las redes digitales	182
1. La comunicación digital	182
2. La cobertura geográfica de diferentes redes digitales	186
b. Infraestructura de redes	188
1. Tecnologías de acceso	189
2. Red de transporte de siguiente generación (NGN)	197

c. El espectro radioeléctrico	200
<i>Javier Juárez y Omar de León</i>	
1. La gestión del espectro radioeléctrico	201
2. Desafíos para la gestión del espectro ante la convergencia digital	202
d. Internet, la red de redes	207
1. Problemática de una red que no fue pensada para lo que es	208
2. Internet del futuro	210
3. Gobernanza y neutralidad de internet	211
e. Servicios y contenidos digitales	212
1. Contenidos digitales	212
2. Retos actuales	214
f. Conclusiones	216
13. Procesamiento de información	218
<i>Silvia Guardati y Guillermo Morales-Luna</i>	
a. <i>Hardware</i> de computación	218
1. El horizonte de la computabilidad	219
2. Circuitos integrados tridimensionales de silicio	221
3. Computación óptica	224
4. Computación molecular con ADN	229
<i>Ángel Kuri, Osvaldo Cairó y Silvia Guardati</i>	
5. Computación cuántica	232
6. Conclusiones	246
b. <i>Software</i> e inteligencia artificial	247
<i>Osvaldo Cairó</i>	
1. La idea de crear inteligencia artificialmente	248
2. Historia de la inteligencia artificial	251
3. Los diferentes enfoques de la inteligencia artificial	258
4. Algunos campos de estudio de la inteligencia artificial	263
5. El término inteligencia artificial es objeto de polémica	272
6. Aplicaciones de la IA	275
14. Almacenamiento de información	279
<i>Silvia Guardati y Osvaldo Cairó</i>	
a. Diferentes tipos de memoria para fines diversos	279
1. Memorias inmersas	281
2. Memorias externas	283
b. Hacia sistemas de almacenamiento	288
1. Arreglo RAID (<i>redundant array of independent disks</i>)	289
2. Sistema NAS (<i>network-attached storage</i>)	289
3. Sistema SAN (<i>storage area network</i>)	290
4. Almacenamiento autónomo	290

c. Desafíos actuales y nuevas formas de almacenamiento	291
1. Memorias <i>flash</i> con nanotecnología	293
2. Discos versátiles holográficos (<i>holographic versatile disks</i> , HVD)	293
3. Discos PCD (<i>protein coated disks</i>)	295
4. Memorias cuánticas	295
d. Conclusiones	296
15. La amplificación de la inteligencia biológica	297
<i>Edmundo Lozoya</i>	
a. Ideas y conceptos básicos	298
1. Más allá de la inteligencia humana	299
2. Cómo funciona el cerebro	300
3. Cómo aprende el cerebro	302
b. Drogas inteligentes, usos y sus efectos	305
1. Estrategias generales de las drogas inteligentes	306
2. Tipos de drogas inteligentes	307
c. Genómica de la mente	311
1. Ingeniería genética	311
2. Bionootrópicos moleculares	314
3. Genes de la mente	314
d. Conclusiones y aspectos éticos	316
1. Neurología cosmética	317
2. Neuroética	320
Cuarta parte	
CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	321
<i>Martin Hilbert</i>	
16. Conclusiones principales	323
a. La evolución de las TIC continuará	323
b. De la información se pasa al conocimiento	324
c. A medida que se hace omnipresente la tecnología molecular, las TIC son un requisito básico	325
d. Se producirán cambios de paradigma en las avenidas de innovación de las TIC	325
e. La convergencia de las TIC convierte a la red en la computadora	326
Bibliografía	331
Agradecimientos	369

PRÓLOGO

Hace una década que la Cepal realiza un programa de investigación y propuestas de políticas en temas relacionados con la sociedad de la información. Con ello sigue las directivas de la Cumbre Mundial sobre la Sociedad de la Información, celebrada en 2003 y en 2005, a partir de la cual los países de América Latina y el Caribe decidieron desarrollar un plan regional de acción, que se plasmó en la iniciativa eLAC 2007, luego actualizada como eLAC 2010.

En el marco de este programa, la Cepal ha publicado en los últimos años una serie de análisis sobre el acceso y uso de las tecnologías de la información y de las comunicaciones (TIC) en los hogares, las empresas y los gobiernos, así como sobre la investigación, desarrollo, inversión y creación de empleo y riqueza en actividades relacionadas con las TIC. Es en esa línea que se inscribe el presente libro, que forma parte de una serie mayor de títulos, tres de los cuales fueron publicados recientemente con la editorial Mayol.

¿Quo vadis, tecnología de la información y de las comunicaciones? es un libro que presenta los conceptos y las teorías que sustentan los aspectos técnicos y explican qué son, de dónde provienen y hacia dónde evolucionan las tecnologías de la información y de las comunicaciones (TIC). Las TIC son transversales y progresivamente presentes en todo el quehacer tecnológico, económico, social, cultural y político de los países. Sus vertiginosas actualizaciones e innovaciones abren periódicamente nuevas posibilidades de uso.

Este libro pretende establecer un puente entre ingenieros y especialistas, provenientes del ámbito de la economía, las ciencias sociales, la antropología, el derecho y las ciencias políticas. Ambos grupos de expertos poseen complementariedades indispensables en esta época de cambio de paradigma tecnológico. Se precisa un entendimiento básico de las trayectorias tecnológicas, de los conceptos y sistemas subyacentes para captar las implicancias de su uso actual y potencialidades futuras. Esto incluye conceptos sobre la transmisión, procesamiento, interoperación y almacenamiento de información, en un lenguaje que sea entendible por un público amplio.

La Cepal manifiesta su agradecimiento a las instituciones y personas que han apoyado su programa SocInfo y especialmente el apoyo financiero recibido de la Comisión Europea a través del proyecto @LIS y también del Gobierno de Canadá, a través del IDRC.

Alicia Bárcena
Secretaria Ejecutiva
Cepal

INTRODUCCIÓN

Este documento es el resultado de un trabajo conjunto que presenta la literatura, los conceptos y las teorías detrás de los aspectos técnicos que explican *qué son, de dónde provienen y hacia dónde evolucionan* las tecnologías de la información y de las comunicaciones (TIC). Las TIC constituyen en la actualidad la principal herramienta técnica de uso general, ya que permean progresivamente los aspectos socioeconómico, cultural y político de nuestras vidas. Se les reconoce como grandes impulsoras del desarrollo, y se estudian en cumbres mundiales e innumerables conferencias sus diversas aplicaciones. Sin embargo, es difícil comprender la naturaleza técnica de este complejo y cambiante sistema; al contrario de lo que ha ocurrido con otras tecnologías más antiguas de uso general, como la electricidad y el motor de combustión interna para el transporte, los conceptos y dinámicas de las TIC no despiertan tanto la intuición de quienes ejercen cargos influyentes. Los pilares del paradigma digital son conceptos como *conocimiento, información y comunicación*; estos conceptos representan los ladrillos y el combustible del nuevo paradigma y constituyen el motor del progreso y el desarrollo. Para llegar a comprender los sistemas de TIC, se deben tomar en cuenta los conceptos básicos de campos que hasta el momento eran considerados diferentes, como la teoría de la información, las telecomunicaciones, la ciencia cognitiva, la informática y, cada vez más, la nanotecnología y la biotecnología. La evolución de las TIC no puede resumirse en un aspecto específico de los sistemas digitales como el microprocesador, el teléfono móvil o los portales de internet; la convergencia requiere un enfoque amplio para captar la dinámica actual y futura del sistema entero.

Naturalmente, los expertos que se ocupan de discutir y decidir cómo la tecnología digital puede ser utilizada para el desarrollo, están representados en dos grupos: por un lado se hallan quienes ven el fenómeno digital a través del prisma de los *bits* y los *bytes*, como los ingenieros de las telecomunicaciones y de las ciencias de la computación; por otro lado se encuentran los investigadores y los encargados de formular normativas, quienes consideran la reorganización socioeconómica desde la perspectiva de la economía, las ciencias sociales, la antropología, el derecho y las ciencias políticas, entre otras disciplinas. Ambos grupos de expertos poseen complementariedades indispensables, en esta época en que el mundo necesita una guía en medio del cambio de paradigma tecnológico. Si bien las diferencias afloran en seminarios y grupos

de trabajo en todo el mundo, la divergencia en el enfoque se siente especialmente en los países en desarrollo, donde los malos entendidos y diferentes concepciones pueden derivar en consecuencias desventajosas, y en un contexto de escasos recursos incluso en consecuencias desastrosas.

Quienes están encargados de formular políticas o de analizar fenómenos ligados al progreso técnico, requieren información acerca del amplio abanico de posibilidades en el futuro y la dinámica inherente al sistema tecnológico. Esta información y constante actualización es de particular importancia en las regiones en desarrollo como América Latina y el Caribe, dado que la mayor parte de la elaboración de tecnología es exógena a estas economías. La mayoría de las soluciones de TIC se planifican, diseñan y elaboran en el mundo desarrollado, y caen como “maná del cielo” para los países latinoamericanos o caribeños. Aunque no han hecho parte de su conceptualización y desarrollo, las autoridades y analistas deben adaptar sobre la marcha sus reglamentaciones y estrategias para el desarrollo doméstico. Para reducir este nivel de incertidumbre es indispensable fomentar la comprensión de la evolución y tendencias en los sistemas de TIC. Así, las decisiones se centrarían en buscar la mejor manera de adoptar las nuevas tecnologías. Para un entendimiento general sobre “lo que son las TIC”, se pueden buscar iniciativas, proyectos y políticas adecuadas, como aquellas necesarias para la reglamentación del mercado (*hardware*, *software* y telecomunicaciones), la digitalización de procesos en áreas específicas (gobierno, negocios y aprendizaje digitales), y la creación de los esquemas e incentivos necesarios (capacitación, instituciones y legislación).

Con este libro se hace un aporte al explicar los aspectos técnicos del progreso en los sistemas de TIC. Desde una perspectiva histórica, está claro que ningún gobernante o analista de la era de la revolución industrial hubiera podido ayudar a su sociedad durante esa transición sin una comprensión general de la termodinámica y del funcionamiento de la máquina de vapor. Se precisa un entendimiento básico de los conceptos y sistemas subyacentes para poder evaluar lo que es factible con esta tecnología y captar las implicaciones de su uso, como son la naturaleza de su aplicación, los efectos laterales, el tipo de industrias conexas, la infraestructura de apoyo y las implicaciones para otros rubros. Sin una comprensión general de los aspectos técnicos básicos, la discusión sobre oportunidades y desafíos desemboca rápidamente en malos entendidos, mitos, exageraciones y todo tipo de confusiones. Estos sólo nos desvían de la enorme tarea de explorar con una visión crítica la significación de las nacientes sociedades de la información y el conocimiento.

Mediante este trabajo esperamos hacer una contribución para cerrar la brecha que existe entre el enfoque socioeconómico y la perspectiva técnica sobre el desarrollo de la sociedad de la información y el conocimiento. El objetivo es identificar las trayectorias naturales del paradigma digital y estudiar las actuales características que puedan influir en el progreso tecnológico, además de analizar las tecnologías que se están gestando en la actualidad. En el libro se presentan las diversas tecnologías que componen el paradigma digital a un público amplio que incluye a investigadores sociales, autoridades del sector público y privado y especialistas en subsistemas técnicos, que estén interesados en una mirada más amplia sobre el desarrollo de las TIC.

Para este fin se ha reunido a un grupo de destacados profesores universitarios especializados en informática e inteligencia artificial, ingeniería de las telecomunicaciones y sistemas digitales, física, economía y otras disciplinas. Esta forma representativa de complementar el análisis socioeconómico de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal) y la capacidad técnica del Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM) demuestra la necesidad de fusionar ambos enfoques, para poder comprender las características de las actuales sociedades de la información y el conocimiento. Los autores están convencidos de que el entendimiento de los conceptos básicos sobre la transmisión, procesamiento, interoperación y almacenamiento de información es esencial para comprender las implicaciones que estas tecnologías tienen en las actuales transformaciones de la organización social y productiva. Un mejor entendimiento de las trayectorias tecnológicas puede ayudar a maximizar la asignación de recursos, descubrir futuros ámbitos de interés y diseñar estrategias para dar saltos cualitativos en la aplicación de tecnologías que contribuyan al desarrollo y a la reducción de la pobreza.

Con un libro sólo se puede ofrecer una introducción selectiva a un tema complejo mientras se transita el estrecho sendero entre el lenguaje muy técnico o demasiado general. Es de esperar que algunos lectores encontrarán que ciertas partes del libro les resultan repetitivas, mientras que en otras partes les faltará profundidad. Estamos conscientes de esta limitación y hemos hecho un esfuerzo de encontrar un balance. El objetivo principal es ofrecer al lector una idea general sobre la literatura, los conceptos y teorías detrás de los aspectos técnicos del paradigma digital, las respectivas trayectorias tecnológicas y el actual estado del arte de las TIC.

RESUMEN

Este libro presenta los aspectos técnicos del progreso en los sistemas digitales, generalmente conocidos como las tecnologías de la información y de las comunicaciones (TIC). Es el resultado de un trabajo conjunto entre un grupo amplio y heterogéneo de docentes universitarios y analistas de América Latina, Europa y Estados Unidos. A lo largo de tres partes se intenta responder a los interrogantes sobre *qué son las TIC, de dónde provienen, y hacia dónde evolucionan*. Está dirigido a una audiencia interesada en profundizar su conocimiento sobre la naturaleza técnica que fundamenta este sistema tecnológico predominante hoy día. Los autores están convencidos de que un entendimiento común de los conceptos básicos de las TIC, es esencial para comprender las implicaciones de estas tecnologías en las actuales transformaciones de la organización social y económica.

En cada una de las partes se aborda el paradigma de las TIC desde un ángulo diferente. Según el lector, uno de los enfoques podrá parecer más adecuado mientras los otros dos podrán esclarecer aspectos diferentes del mismo tema. En la primera parte se presentan conceptos y teorías con su literatura correspondiente; en la segunda parte se explican las trayectorias tecnológicas de cada uno de los subsistemas de TIC, y en la tercera parte, la más larga, se presentan las TIC más avanzadas y las posibilidades para el futuro. Al final se agrega una última parte del libro, que son conclusiones generales. Se señalan las tendencias y perspectivas del paradigma digital.

El libro ha sido escrito de forma tal que no es necesario leer los capítulos en orden, y de todas maneras se podrá mantener el contexto de un sistema interdependiente; se invita al lector a concentrarse en aspectos específicos de los sistemas de TIC. La amplitud del tema obligó a los autores a limitarse a presentar la literatura y los conceptos más relevantes, aunque se otorgará al lector una base adecuada para seguir investigando temas específicos. Si bien no se ofrece una colección completa y exhaustiva de todas las referencias, nombres y logros de las personalidades clave y de sus obras, las explicaciones que se incluyen en el libro proveerán al lector de una base histórica y antecedentes recientes que le permitirán contextualizar el desarrollo dinámico de las TIC, y de una síntesis de las actuales contribuciones y debates.

La primera parte del libro comienza con la presentación de la noción schumpeteriana del progreso socioeconómico evolutivo, que es inseparable del progreso técnico. Luego se exponen los diferentes subsistemas que constituyen las tecnologías de uso

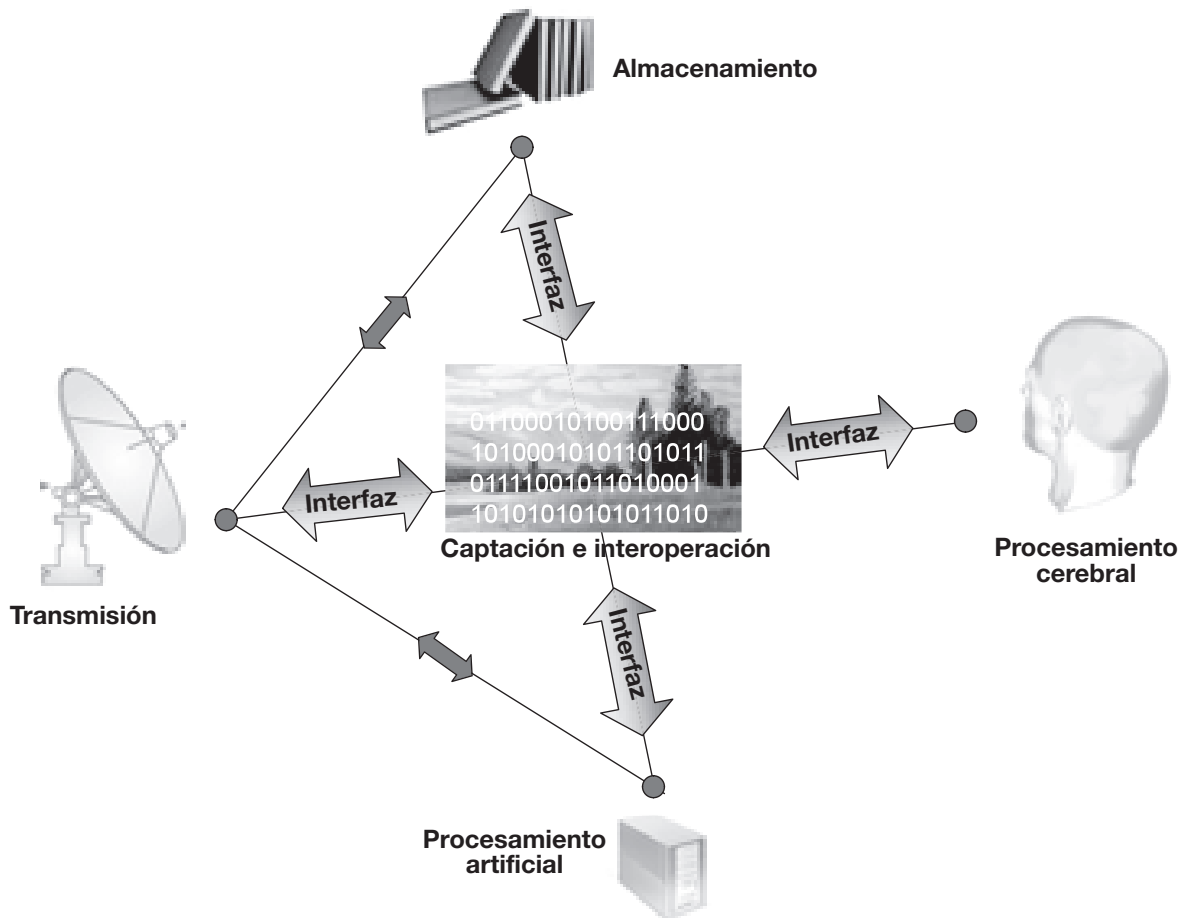
general, conocidas como TIC. El marco conceptual de este libro sugiere la identificación de cuatro operaciones diferentes que puedan realizarse con sus respectivas soluciones tecnológicas. En uno de estos sistemas tecnológicos se capta y se *interopera* información; esta información puede estar en un formato –como sonoro o fotográfico– y los sensores son utilizados para captarla y adaptarla a otro formato adecuado que permita seguir procesándola y eventualmente desplegarla en las interfaces relacionadas. Dentro del paradigma digital, estas tecnologías adaptan la información al formato binario; la adaptación de la información en un *bit*, que representa la información en 1 o 0, es el paradigma científico subyacente de la era digital. El dígito binario resulta ser extraordinariamente útil para realizar las otras tres operaciones de información tecnológica. Por ejemplo, puede ser *almacenado* en algún tipo de memoria para preservar la información y utilizarla más adelante; además, puede ser *transmitido* de manera efectiva. Como afirmó el padre de la teoría de la información, Claude Shannon (1948), “el problema fundamental de la comunicación es reproducir de forma exacta o aproximada en un punto un mensaje que fue seleccionado en otro punto”. El dígito binario también puede ser *computado*, lo que significa que puede ser procesado artificialmente de manera que cambie el contenido de la información con un resultado que tiene significado para el usuario. Más allá de estas cuatro operaciones tecnológicas, el cerebro humano es el receptor indispensable que contribuye en este proceso dinámico de trabajar con información. En el gráfico se presenta la esquematización básica sobre la cual está basado este libro.

En el último capítulo de la primera parte se incluye la literatura sobre las TIC que se refiere a la definición de los siempre presentes conceptos de datos, información, conocimiento e inteligencia. Se discute la distinción entre la noción de sociedad de la información y sociedad del conocimiento, y las posibles maneras de interpretar estos conceptos.

En la segunda parte del libro se analizan las trayectorias tecnológicas de las TIC. Las trayectorias evolutivas de los sistemas tecnológicos ofrecen importantes explicaciones sobre la esencia del progreso técnico, que a su vez está relacionado a la naturaleza del desarrollo socioeconómico. Al principio se ofrece una introducción a la literatura sobre el progreso técnico y luego se analizan los diferentes subsistemas de TIC. Se calcula cuánta información está siendo captada, almacenada, transmitida y procesada en todo el mundo, y también se presentan las avenidas de innovación de las tecnologías de transmisión de información, las soluciones de procesamiento y los dispositivos de almacenamiento. Para cada una de estas posibilidades de trabajar con información, en los últimos milenios de la historia de la humanidad han existido entre cuatro y seis paradigmas tecnológicos.

La tercera parte del libro es la parte más extensa y presenta el estado del arte de las TIC. La parte comienza con una breve introducción a la nanotecnología y la biotecnología. En términos generales se cree que estas ciencias moleculares constituirán las próximas tecnologías de uso general, y ya están siendo incorporadas cada vez más en el desarrollo de sistemas modernos de TIC. Luego, se presentan los sensores e interfaces más avanzados, redes y sistemas de comunicación, diferentes tipos de computadoras y conceptos relacionados, y sistemas de almacenamiento.

ESQUEMATIZACIÓN DE LAS CINCO OPERACIONES INFORMÁTICAS BÁSICAS



Fuente: elaboración propia.

En la parte final del libro se llega a las siguientes conclusiones:

1. *La evolución de las TIC continuará.* Las tecnologías para adaptar, almacenar, transmitir y procesar información son mucho más antiguas que las TIC digitales y han demostrado un crecimiento exponencial en su rendimiento desde los días cuando la humanidad se comunicó con señales de humo y papiro. Según la teoría del progreso técnico, no existe razón porque no deberán continuar evolucionando a un ritmo veloz y no se vislumbra un giro importante. Se verá que cada año se está creando más información que en los cientos de años anteriores y en la actualidad no se puede prever un límite inminente que restringirá el crecimiento de la cantidad de información que puede ser procesada por una sociedad y sus máquinas. A medida que el crecimiento exponencial está supe-

rando umbrales significativos, el índice sostenido de innovación hace que el desarrollo futuro sea cada vez más incierto.

2. *De la información se pasa al conocimiento.* Ya no dan abasto las soluciones tecnológicas con las que se podría procesar efectivamente el mayor caudal de información de las redes digitales. Las sociedades de la información en la actualidad se caracterizan por estar desbordadas. Las investigaciones se están concentrando en la tarea de extraer significados de la avalancha de información disponible y convertirla en conocimiento. Es de esperar que el eje del progreso técnico sea el enfoque cognitivo para las soluciones tecnológicas que produzcan inteligencia, en lugar de la simple construcción de infraestructura de las comunicaciones.
3. *A medida que la tecnología molecular se hace omnipresente, las TIC son un requisito básico.* El paradigma digital está siendo cada vez más permeado por las tecnologías mediante las cuales se manipulan moléculas, como la nanotecnología, la biotecnología y la tecnología genética. Se cree que el paradigma molecular constituirá la próxima onda larga socioeconómica de la humanidad, y que convertirá al paradigma digital en condición *sine qua non* para el progreso socioeconómico, de la misma manera que los anteriores paradigmas del motor de combustión interna en el transporte o la electricidad se han hecho indispensables para el desarrollo actual.
4. *Se producirán cambios de paradigma tecnológico en las trayectorias de innovación de las TIC.* En los cuatro subsistemas de TIC (interoperación, almacenamiento, transmisión y computación) se observan caminos evolucionarios bien marcados con paradigmas tecnológicos diferentes, y varios de los actuales paradigmas están alcanzando sus límites. Con las técnicas actuales para producir *hardware* se afrontan problemas de tamaño, y el método de fuerza bruta para la elaboración de *software* no ha conducido a las esperadas soluciones inteligentes. Además, el progreso en la nanotecnología y la biotecnología parece empujar a los sistemas de TIC hacia el paradigma molecular. Esto indica que habrá cambios de paradigmas tecnológicos en las avenidas de innovación de las TIC (innovaciones disruptivas y radicales), lo que a la vez siempre ofrece una oportunidad para dar un salto cualitativo.
5. *La convergencia de las TIC convierte a la red en computadora.* La total convergencia en el *bit* se traduce en una armónica red de tecnología. Los límites entre dispositivos de transmisión de información, almacenamiento y procesamiento han comenzado a desaparecer, y la naturaleza descentralizada del sistema que se adapta convierte a la red en la computadora. Los procesos de conocimiento se distribuyen entre varios agentes, y se crean algoritmos colectivos descentralizados a lo largo de una red unificada. Deben estudiarse todavía más los efectos de esta situación en el desarrollo socioeconómico.

PRIMERA PARTE

EL PARADIGMA DIGITAL

1. LA RECIENTE ONDA LARGA DE DESARROLLO HUMANO¹

La información ha tenido un papel fundamental a través de la historia, y la posibilidad de compartirla mediante la comunicación sigue asombrando a la humanidad. El intercambio de información es lo que define la conducta del ser humano, y le da una connotación omnipresente y casi mística.² Muchos lingüistas y biólogos sostienen que el invento de almacenar información por medio de diversas técnicas y tecnologías, con el arte, el lenguaje o las herramientas, representa el hito que impulsó a los humanos a convertirse en la especie superior en este planeta (Henshilwood y otros, 2002).³ El *homo sapiens* (hombre sabio) se distinguió al ser el primero que pintó símbolos en las paredes de las cavernas para transmitir mensajes. Si bien otras especies se valen de herramientas para sus diversas actividades físicas y su alimentación, parece ser que al humano lo distingue el uso de dispositivos artificiales para capturar, almacenar, transmitir y procesar información, que a su vez ha llevado al sorprendente efecto multiplicador y crecimiento exponencial de nuestra base de conocimiento a lo largo de miles de años.

La fascinación con el poder de los símbolos y los significados se ha intensificado últimamente. Desde que Francis Crick y James Watson (Watson y Crick, 1953) confirmaron que la respuesta a la famosa pregunta “¿qué es la vida?” de Erwin Schrödinger (1944) es la información codificada en una estructura molecular llamada ácido desoxirribonucleico (ADN), la mística sobre el significado de la información entró a una nueva dimensión. Algunos sectores explican el fenómeno de la vida inteligente como la expresión de complejos patrones de información, con códigos genéticos que se transmiten de una generación a otra y sistemas de conductas que se aprenden

¹ Este capítulo ha sido escrito por Martin Hilbert, de la Cepal.

² En la *Biblia*, el evangelio de San Juan incluso considera a la palabra como la primera señal de la existencia: “En el principio existía el Verbo y el Verbo estaba con Dios y el Verbo era Dios ... y el Verbo se hizo carne y habitó entre nosotros ...” Evangelio de San Juan 1.1-1.14.

³ Sobre el contexto entre la investigación lingüística y la evolución humana, véase Bickerton (1995) y Jablonski y Aiello (1998).

(Yockey, 2005; Baum, 2004). Más recientemente, se ha asegurado que todo el universo físico está construido sobre los cimientos que se denominan “información” (Talbot, 1991; Bekenstein, 2003).

Dentro del concepto de sociedad de la información, los autores no niegan la importancia clave de la información para la vida y la existencia de las personas a través de la historia. No obstante, en este trabajo se ha aplicado el concepto desde la perspectiva de las ciencias políticas y socioeconómicas. En ese sentido, la sociedad de la información es un concepto de sociedad en la cual la captación, almacenamiento, transmisión y procesamiento de información es la acción socioeconómica y política más importante (Webster, 1995, Castells, 1996). En algunos sectores se afirma que los recientes avances tecnológicos han introducido un cambio cualitativo y cuantitativo en nuestra forma de manejar la información, y que han convertido este proceso en una de las actividades más importantes para el ser humano. El origen del concepto es discutible, y puede vincularse a los primeros días del telégrafo y la pregunta visionaria de Nathaniel Hawthorne en 1851 (Hawthorne, 1851): “¿El mundo de la materia se ha convertido en un gran nervio, vibrando a miles de kilómetros en una milésima de segundo? ¡Más bien, el globo terráqueo es una vasta cabeza, un cerebro, instinto con inteligencia!”. Entre otras referencias trascendentes también debemos incluir el argumento de Norbert Wiener (Wiener, 1948): “La sociedad sólo se puede comprender al estudiar el intercambio de mensajes y sus instalaciones de comunicación, y al entender que en el desarrollo futuro de estos mensajes y estas instalaciones, la comunicación entre el hombre y las máquinas, entre las máquinas y el hombre, y entre máquina y máquina, tendrá una importancia cada vez mayor”. El economista austriaco Fritz Machlup fue quien creó el concepto de sociedad de la información y lo expresó en su libro de 1962 *The Production and Distribution of Knowledge in the United States* (*La producción y distribución del conocimiento en Estados Unidos*), en el que concluye que el número de personas que se dedican a manejar y procesar información es mayor al de empleados que realizan tareas con un esfuerzo físico. Otros autores, entre ellos Peter Drucker con su obra *Age of Discontinuity* (*La era de la discontinuidad*) (Drucker, 1969) y Daniel Bell con su libro *Coming of Post-industrial Society* (*El advenimiento de la sociedad posindustrial*) (Bell, 1973), destacaron que el conocimiento sería el principal factor de creación de riqueza en la sociedad del futuro. Estas afirmaciones desataron un debate sobre los conceptos “sociedad de la información” y “sociedad del conocimiento”; la discusión continúa y será abordada en el capítulo dedicado a la información, el conocimiento y las TIC. El sociólogo japonés Yoneji Masuda fue el primero en analizar el papel de la información como principal componente de este proceso y las condiciones tecnológicas necesarias para ese desarrollo en *The Information Society as Post-industrial Society* (*La sociedad de la información como sociedad posindustrial*) (Publishing World Future Society, Estados Unidos, 1981). Como indican los explícitos títulos de estas y otras obras de referencia, los estudiosos situaron el concepto naciente de una sociedad de la información en el marco de la arraigada teoría de Schumpeter de las ondas largas y cambios de paradigma, un enfoque evolutivo del desarrollo y progreso de la humanidad.

a. Schumpeter y sus discípulos

La teoría de Schumpeter sobre el cambio socioeconómico (Schumpeter, 1934) ha sido ampliada por los representantes de una muy respetada corriente, a quienes se denomina evolucionistas en lo socioeconómico o neoschumpeterianos. El argumento central es el de la existencia de ciclos en el desarrollo que se caracterizan por índices de crecimiento bastante constantes, que conducen a un progreso exponencial si éste se mide en términos absolutos. El economista austriaco Joseph Alois Schumpeter (1883-1950) investigó los altibajos del desarrollo, e identificó la existencia de un patrón cíclico en las fluctuaciones periódicas y secuenciales de la actividad económica, “un número indefinido de fluctuaciones en forma de ondas que se mueven simultáneamente y se entrelazan”. El economista señaló que estos ciclos tienen diferentes duraciones, es decir, aparecen en diversos niveles, con algunos de ellos dentro de otros. Según Schumpeter, los ciclos parecen estar especialmente vinculados a diferentes sistemas tecnológicos y a su difusión y absorción por parte del sistema económico, lo que se refleja en los precios, tasas de interés, índices de empleo y niveles de producción (1939). Algunas de las fluctuaciones son cortas y duran pocos meses, mientras que otras se prolongan durante décadas. El economista austriaco explica que “las innovaciones, sus efectos inmediatos y ulteriores, y la respuesta del sistema, son la causa común, aunque diferentes tipos de innovaciones y diversos tipos de efectos puedan jugar distintos roles... Si las ondas más cortas de innovaciones se producen alrededor de una onda de innovaciones similares pero más larga, la secuencia de las etapas de la segunda determinará las condiciones bajo las cuales las primeras surgen o se distinguen para crear una unidad más importante, aunque las innovaciones que las componen sean totalmente independientes de las innovaciones que forman parte de la onda más larga”. El resultado es una interpretación del desarrollo económico según la cual existe un complejo sistema de innovaciones, compuesto de diferentes niveles de la actividad humana que se influyen, potencian o restringen mutuamente. Así, la dinámica es definida por una cierta jerarquía de ondas, y esta conducta en forma de ondas lleva a una evolución continua del progreso económico. “Estos ciclos desplazarán sus puntos más álgidos y más bajos entre sí y entre ellos producirán curvas, que no se pueden comprender sin reconocer las etapas de otros ciclos en las que pueda caer un ciclo determinado” (Schumpeter, 1934). A un nivel abstracto relativamente alto, este análisis lleva a identificar claramente ciclos económicos de largo plazo entre el auge y la depresión, como lo había planteado el economista ruso Nikolai Kondratieff (1925), quien pagó con su vida por la naturaleza revolucionaria de sus ideas.

Medio siglo más tarde, estas ideas se han extendido más allá del ámbito económico para explicar la dinámica de las “conductas armónicas o no armónicas del sistema socioeconómico e institucional en su totalidad –a nivel nacional e internacional– en el que las ondas largas representan esquemas sucesivos especiales de desarrollo, que responden a estilos tecnológicos sucesivos particulares” (Pérez, 1983). Dichos estilos tecnológicos, a los que también se denomina paradigmas tecnoeconómicos o socioeconómicos, representan el tipo ideal de organización productiva y social, que se desarrolla dentro del marco de conocimiento disponible para afrontar los retos que van

surgiendo. “El establecimiento de ese estilo o paradigma se basa en la introducción de una constelación de innovaciones entrelazadas, tanto técnicas como administrativas”, que llevan a un resultado socioeconómico que es “claramente superior a lo que era ‘normal’ bajo el esquema tecnológico anterior” (Pérez, 1983). En el campo de la economía y otras ciencias sociales, el centro de la atención es la relación entre las instituciones y el progreso técnico. Se hace énfasis en la creación de instituciones que puedan guiar ese cambio tecnológico en la dirección deseada; el concepto de institución abarca a los derechos de propiedad, los organismos y marcos financieros, y los emprendimientos de investigación y desarrollo, entre otros. Qué es lo que llega primero, la tecnología o el marco institucional, representa la pregunta clásica sobre el huevo o la gallina. Douglass North (1981) destaca la importancia de ciertas características en las ideologías y las instituciones y demuestra el innegable efecto que conlleva el derecho a la propiedad para lograr un mayor caudal de conocimiento. Otros autores describen esta dinámica como una coevolución entre sistemas tecnológicos especiales y la organización socioeconómica (Freeman y Louçã, 2001).

b. La naturaleza y el entrelazado de las ondas dentro de otras ondas

Cuando se intenta identificar la naturaleza de las ondas largas, las dos preguntas que surgen están relacionadas a la periodización de cada ciclo y al tipo de producción, es decir, a su impacto. Con respecto a la duración de cada onda, se reconocen como características actuales la aceleración del cambio tecnológico; la innovación; la formación de conocimiento; y nuestra organización social y productiva que, por intuición, nos hace pensar que los ciclos deberían ser más cortos. Se ha identificado el incremento constante en la velocidad del progreso y se lo ha analizado en profundidad a través de los hitos que marcan diferentes aspectos de la evolución, incluyendo los cosmológicos, geológicos, biológicos y socioeconómicos. Mientras en la evolución biológica se demoró 2.400 millones de años para que de una simple bacteria se formaran organismos multicelulares, llevó aproximadamente 400 millones de años para que esa forma de vida pasara a ser un gusano, alrededor de 300 millones de años más para alcanzar la etapa de reptil, “solamente” otros 250 millones de años para que nacieran los primates, y menos de 100 millones de años para que esa forma de vida inferior se convirtiera en el ser humano moderno (Modis, 2002). El mismo proceso se ha producido con respecto a las innovaciones que nos permiten dominar el entorno. Hay diferentes fuentes, pero se calcula que a la raza humana y sus ancestros les llevó entre 250.000 y un millón de años avanzar desde el descubrimiento de la utilidad del fuego hasta alcanzar la habilidad de hacer fuego por sí mismos. Este hecho no deja de sorprender, especialmente cuando se considera que las herramientas de piedra ya existían y seguramente a veces producían chispas cuando se las usaba. Pasaron largas noches frente al fogón en un período que es al menos 125 veces mayor al tiempo que ha transcurrido desde el momento en que se cree nació Jesucristo y comenzó el calendario del mundo occidental. La creatividad innovadora de nuestra especie fue tremendamente lenta. El acelerado ritmo del progreso ha cambiado esta periodicidad, y

desde la primera vez que un ser humano voló unos 300 metros en 1903 y aterrizó sano y salvo, hasta que llegamos a la Luna en 1969, sólo se necesitaron 66 años.

Modis (2002) analizó 13 secuencias de eventos históricos importantes desde el *big bang* (todos hechos por investigadores independientes, incluyendo cientos de eventos). Como resultado, él demostró que toda la historia de vida en nuestro universo se caracteriza por tener períodos cada vez más cortos entre los acontecimientos significativos. En su influyente estudio, Modis clasifica el período entre el *big bang* y la actualidad en siete etapas: la formación de la galaxia (hace 10.100 millones de años); la vida multicelular (desde hace 1.050 millones de años); el surgimiento de los primates superiores (hace 4 millones de años); el nacimiento del *homo sapiens* (hace 308.000 años); el ser humano moderno con conductas rituales y espirituales (hace 38.200 años); la sociedad agrícola y la civilización (hace 6.130 años), y la ciencia y la tecnología (hace 225 años).

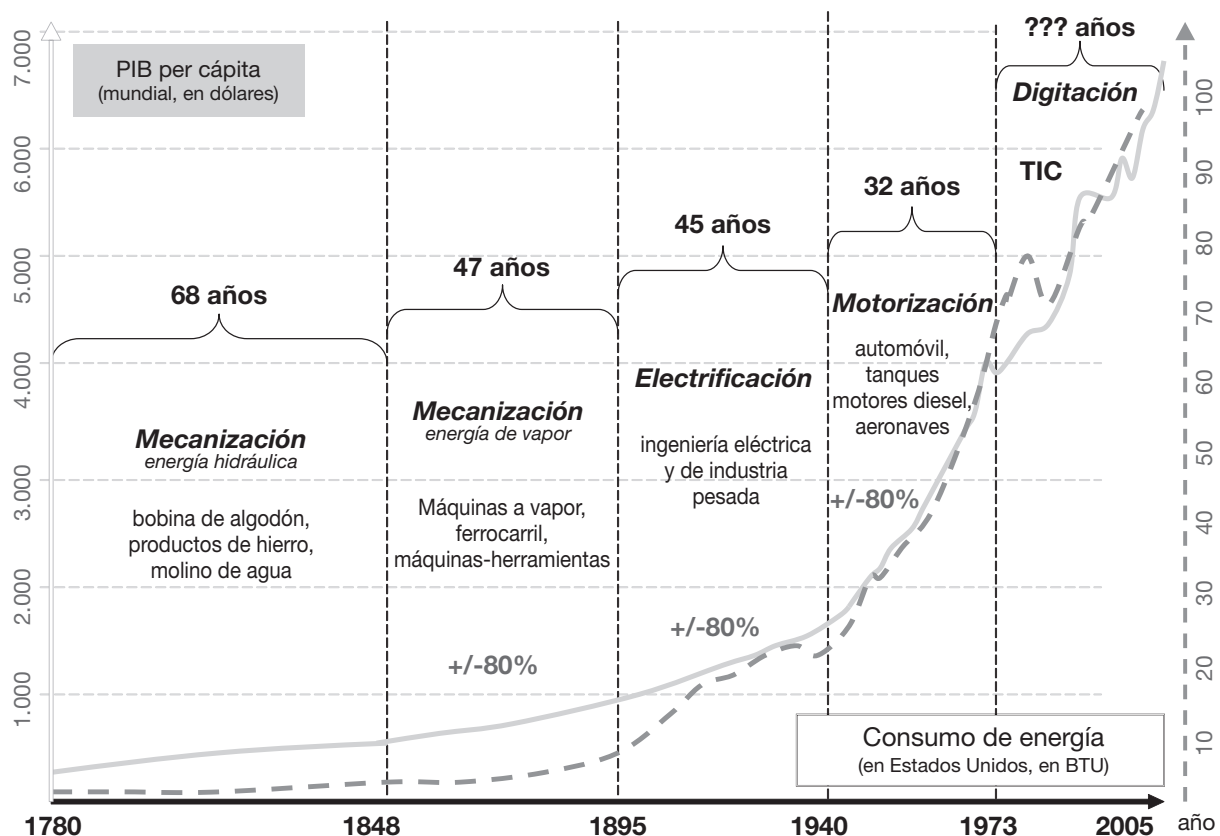
Douglass North (1981), quien recibió un Premio Nobel por sus investigaciones, se concentra en las últimas dos épocas, a las que identifica como la primera y la segunda revolución económica. North profundiza en el marco institucional de cada una de esas etapas y señala que la aparición de la propiedad privada de la tierra no se puede separar del establecimiento de sociedades agrícolas, un hecho que a su vez revolucionó las estructuras socioeconómicas y llevó a la creación de asentamientos y a la civilización. Según esta teoría, el segundo cambio de paradigma se produjo con la fusión de la ciencia y la tecnología para incrementar de manera intencional el caudal de conocimiento de la humanidad, especialmente con la introducción de los derechos de propiedad intelectual. North sostiene que “la mera curiosidad o el aprendizaje autodidacta trae un cierto cambio tecnológico, como el que se había podido observar a través de la historia de la humanidad. Pero el esfuerzo dedicado a mejorar la tecnología –como se ve en el mundo moderno– sólo se puede estimular al mejorar las posibilidades de obtener ganancias personales”.

Si bien estos ciclos mayores se distinguen por los acontecimientos vinculados a su marco físico, biológico y, más recientemente, socioinstitucionales, en el profundo análisis de Schumpeter se asevera que existe “un número indefinido de fluctuaciones en forma de ondas” que se complementan y ejercen influencia entre sí, es decir, ondas dentro de otras ondas. Los historiadores han recurrido a los nombres de las tecnologías de fabricación de herramientas para identificar los subciclos específicos de una onda mayor. La periodización arqueológica del período de la agricultura y la civilización en la historia de la humanidad, comúnmente se subdivide en la secuencia descendente de “edad de piedra” (2.000.000 a. C. hasta 3.300 a. C., con una duración de 1.996.700 años); “edad de bronce” (3.300 a. C. hasta 1.200 a. C., con una duración de 2.100 años); y la “edad de hierro” (1.200 a. C. hasta 44 a. C., con una duración de 1.156 años). De acuerdo con este análisis, no sólo los ciclos en el mayor nivel de abstracción se vuelven cada vez más cortos, sino también los ciclos en el nivel menor de la abstracción. Freeman y Louçã (2001) han seguido el enfoque de utilizar la tecnología para identificar los subperíodos de la ciencia y la tecnología en los últimos 225 años, y han señalado cinco de ellos en el nivel abstracto menor. Estos subperíodos concuerdan con la definición de ciclo de Kondratieff. Comienzan con la era de la energía hi-

dráulica de la revolución industrial en Gran Bretaña (1780-1848); la era de la energía a vapor (1848-1895); la era de la electricidad (1895-1940); la era del motor (1940-1973), y terminan con lo más reciente de Kondratieff, la era digital de las tecnologías de la información y la comunicación. Según esta teoría, la periodización de esta clasificación también se va acortando con el tiempo (véase el gráfico 1.1).

Después de haber determinado que los ciclos de ondas largas ocurren cada vez más rápido, el próximo paso sería preguntar sobre el impacto real que estos fenómenos producen. Se entiende que cada nueva onda debería representar una mejora y no un retroceso, y esto se podría representar con las variables económicas como, por ejemplo, los recursos que todos tienen a su disposición. También se podría represen-

Gráfico 1.1
ESCALA LOGARÍTMICA DEL IMPACTO QUE HA TENIDO
EL PARADIGMA DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA



Fuentes: Freeman, Chris y Francisco Louçã (2001), *As Time Goes By. From the Industrial Revolutions to the Information Revolution*, Nueva York, Oxford University Press.

Hitotsubashi University (2006), "Historical GDP statistics", Tokio, Institute of Economic Research (IER) (en línea) <http://www.ier.hit-u.ac.jp/~kitamura/data/Source/WorldPopulationData.xls>

Departamento de Energía de Estados Unidos (2006), "Energy perspectives" (en línea) http://www.eia.doe.gov/emeu/aer/ep/ep_frame.html

tar con la variable más general del consumo de electricidad, que expresa el avance de la sociedad hacia el control de las fuentes de energía para poder cambiar y controlar su entorno. En el gráfico se muestran ambas variables en la era de la ciencia y la tecnología. Hay un incremento tanto para el consumo de energía como para el PIB per cápita, con una sutil pero notable conducta en forma de onda que corresponde a los últimos cambios de paradigma identificados (cuando el registro de las estadísticas correspondiente fue de mejor calidad). Esto demuestra que el progreso se ha logrado al menos a un ritmo constante (+/- 80% durante cada paradigma). Sin embargo, cabe recordar que el resultado de crecimiento constante representa un aumento exponencial de la producción total. Así se explica que un niño o una niña que tenía diez años en 2000 haya vivido en esos diez años el mismo incremento absoluto en la producción económica que su bisabuela que vivió entre 1875 y 1950 (en ambos períodos se produjo una mejora de 1.200 dólares en el ingreso per cápita). Es notable que cada período se caracteriza por un cierto grado de dispersión a un nivel abstracto menor, lo que puede ser descrito como una función en forma de onda entre la irrupción, el entusiasmo, la sinergia y la madurez del paradigma dominante (Pérez, 2002).

Resulta ser que las cinco ondas largas señaladas en el esquema de Kondratieff, Freeman y Pérez, son en realidad ondas cortas de cambios de paradigma incluso mayores. El paradigma digital es, por tanto, la quinta onda en la era de la ciencia y la tecnología, y la definición sobre qué ondas se debe considerar depende de los diferentes niveles de abstracción. Es importante puntualizar que la teoría del cambio evolutivo incluye un abanico de ciclos más cortos dentro de los dos niveles de ciclos que ya se han abordado. El nivel más bajo siguiente es el que llama la atención hacia los paradigmas tecnológicos, lo que a su vez caracteriza a la era digital misma, un fenómeno que se estudia en detalle en el próximo capítulo. Los bien conocidos ciclos de productos también se analizan como parte de esta dinámica innovadora. El esquema que se debe recordar es el de diferentes niveles de abstracción para caracterizar a los aspectos particulares pero entrelazados de la evolución. Más allá del nivel de análisis elegido, la característica común de estos ciclos es que cada vez son más cortos y rápidos.⁴

c. Paradigmas científicos y tecnológicos

La comprensión de la dinámica que subyace a la era actual de ciencia y tecnología, se ha visto muy enriquecida por el trabajo histórico de Thomas Kuhn *The Structure of Scientific Revolutions (La estructura de las revoluciones científicas)* (1962). Kuhn fue

⁴ Hacia dónde llevará esta tendencia cada vez más pronunciada es un tema de intenso debate. Mientras algunos sostienen que el índice de crecimiento exponencial se mantendrá y que “la singularidad está cerca” (Kurzweil, 2005), otros no se apartan de la ley natural de la función logística y creen que lo que está cerca es un punto de inflexión, una postura similar a la del universo que se expande y se contrae (Modis, 2006). En otro sector manifiestan que “la singularidad siempre está cerca” (Kelly, 2006), lo que invita a reevaluar nuestra percepción del tiempo.

quien popularizó el término paradigma, al que definió básicamente como una serie de valores que comparte una sociedad, una composición de acuerdos sobre cómo se deben entender los problemas. Al analizarlo desde el prisma de la economía, Douglass North (1981) lo describe como “ideologías (que) son intentos intelectuales de racionalizar los patrones de conducta de individuos y grupos”, y hace una analogía explícita con el pensamiento de Kuhn al describir su naturaleza y su dinámica. Los paradigmas científicos son esenciales para el progreso, no sólo para reducir los costos del cambio entre las diferencias en *Weltanschauung* (nuestra forma de percibir la realidad), sino también porque es muy poco lo que entendemos de nuestro entorno, y esto conduce al hecho de que “ninguna historia natural se puede interpretar sin al menos contar con un caudal implícito de conocimientos teóricos y metodológicos entrelazados, que permita realizar una selección, evaluación y crítica” (Kuhn, 1962). El resultado es que reescribimos la historia cada vez que hay una nueva escala de valores, según el lente a través del cual el paradigma del momento nos hace percibir e interpretar lo que acontece.

En los momentos de progreso gradual, el deber principal es hacer coincidir la teoría común con los hechos. Durante este proceso se destruyen viejas ideas y se incorporan nuevas, lo que corresponde con el famoso concepto schumpeteriano de “destrucción creativa”. En este sentido, en el comienzo de cada nueva onda hay una idea; el paradigma se comienza a difundir lentamente, muchas de estas ideas nunca se desarrollan y permanecen como ficción. El límite entre la ciencia y la ficción siempre ha sido algo difuso. Como lo ha sentenciado la segunda ley de Clarke sobre los perfiles del futuro, “la única manera de descubrir los límites de lo posible es adentrarse un poco en lo imposible”. En algunos sectores se critica a la ficción porque muchas veces parece ir más lejos de lo posible en la realidad. Otros consideran que la realidad siempre es mucho más rica que la ficción, lo que implica que la ficción nunca va lo suficientemente lejos para explorar el límite de lo posible. Aunque sean contradictorias, estas opiniones siempre tienen un enfoque negativo (Mielnik, 1988).

La combinación de ciencia y ficción, la ciencia ficción, une a los mundos de la ciencia y las humanidades, al mezclar lo imposible con lo posible. Además, presenta el impacto del progreso técnico y científico sobre la sociedad o la persona del futuro. Es indudable que muchos de los avances de la ciencia son concebidos en el ámbito de la ficción. Por ejemplo, Asimov y Clarke han hecho un gran aporte al desarrollo de la ciencia, y sus obras pueden ser descritas como ficción científica al igual que como ciencia ficción. Isaac Asimov, el escritor y bioquímico estadounidense nacido en Rusia, fue el primero en concebir el mundo de la robótica. Engelberger, quien en 1958 construyó el primer robot industrial llamado *unimate*, atribuyó su fascinación con los robots a los libros de Asimov. El escritor británico Arthur Clarke, un inventor apasionado de la matemática, la física y la astronomía, estableció las bases para la fabricación de satélites artificiales en órbita geosincrónica en su artículo de 1945 “Extra Terrestrial Relays” (Repetidores extraterrestres). También fue el autor de “*2001: A Space Odyssey*” (*2001: una odisea espacial*) que presentó, entre otras cosas, la idea de una computadora que contaba con su propia inteligencia artificial y estaba habilitada para dirigir una nave espacial. En la actualidad, la mayoría de los aviones son con-

ducidos por un piloto automático, ideado a partir de la famosa obra de ficción de Clarke.

La mayor parte de una generación considera a la ciencia ficción como un conjunto de extrañas fantasías, mientras que las generaciones subsiguientes toman las ideas exitosas como la inspiración de las soluciones tecnológicas que han sido implementadas; por consiguiente, tanto una invención como una teoría pueden marcar un cambio de paradigma. Kuhn (1962) asegura que ese cambio ocurre cuando el mundo de las creencias “es transformado cualitativamente [y] enriquecido cuantitativamente por novedades fundamentales en los hechos o en la teoría”. Así, la estructura del progreso científico es gradualmente acumulativa por naturaleza, ya que el aprendizaje y la inercia en las ideas juegan un papel importante; también es discontinua, debido a que las rupturas pueden dar origen a cambios revolucionarios de rápido progreso en la dirección deseada. Esto resulta en funciones en forma de ondas con períodos continuos y discontinuos de progreso.

Como se espera que las ideas de estos paradigmas científicos serán implementadas en soluciones tecnológicas, surge la noción de paradigmas tecnológicos en los niveles más bajos de abstracción del entrelazado de ondas dentro de otras ondas. A estos paradigmas se los define como “programas de investigación tecnológica” que se aplican a un tema específico (Dosi, 1984). Al inspirarse en la presentación de la teoría de Kuhn, Dosi describe un paradigma tecnológico como “una perspectiva, una definición de los problemas importantes, una línea de investigación. Un paradigma tecnológico define en su contexto las necesidades que se deben satisfacer, los principios científicos utilizados en la tarea, y el material tecnológico que será usado. En otras palabras, un paradigma tecnológico se puede definir como una serie de soluciones para problemas tecnoeconómicos, que se basa en principios cuidadosamente seleccionados en las ciencias naturales, junto con normas específicas que tienen por objeto la adquisición de nuevos conocimientos” (Dosi, 1988). El paradigma científico de Kuhn define la búsqueda del proceso científico actual para resolver incógnitas, y los paradigmas tecnológicos buscan respuestas prácticas para las preguntas específicas que surgen, tratando de cumplir con las promesas de las ideas e ideologías del momento. En el próximo capítulo se ahonda en las soluciones tecnológicas que se han elaborado para cumplir la promesa de tener acceso permanente y efectivo a la información y las comunicaciones.

2. DEL DÍGITO BINARIO A LA CONVERGENCIA TECNOLÓGICA*

En este capítulo se analiza exclusivamente el paradigma digital y sus características tecnológicas. Según el marco teórico expuesto, la clave para el nacimiento de una nueva onda de progreso es la existencia de una tecnología de uso general. Dentro del concepto de las ondas largas de Freeman y Louçã (2001), el año 1973 es señalado como el comienzo del paradigma digital. Si bien esta fecha puede resultar arbitraria, corresponde a la incorporación del microprocesador, es decir, tiene que ver con una importante innovación de sistemas en una clase especial de proceso informático: la manipulación de información con la ayuda de un circuito integrado de transistores dentro de un solo elemento semiconductor. El paradigma científico que provocó esta innovación de sistemas y muchas otras innovaciones es mucho más antiguo que el microprocesador. La característica común de todas las TIC es el uso del dígito binario, el *bit*, como el método más eficiente de codificar información. En esta sección se comenzará a analizar el marco teórico dentro del cual se pasó a la base científica del paradigma (la idea propiciada por Kuhn). Este marco sirve de fundamento para varias tecnologías de uso general (paradigmas tecnológicos de acuerdo con la definición de Sahal), que son características por la manera en que nuestras sociedades reorganizan su vida socioeconómica (ondas socioeconómicas largas, según la definición de Schumpeter, Freeman y Pérez).

a. El bit como paradigma científico de la era digital

Durante el paradigma digital, la humanidad se ha concentrado principalmente en la creación de soluciones tecnológicas por medio de las cuales se pueda procesar, transmitir, almacenar y adaptar información. De esta manera, mejoramos nuestro entendimiento del significado de información y conocimiento y cómo estos conceptos se relacionan con los procesos cognitivos y la inteligencia. Los científicos aún no comprenden totalmente algunos de estos conceptos, pero en las últimas décadas se han alcanzado grandes logros que han transformado la manera en la que nos percibimos a nosotros mismos y a nuestro entorno. Durante la Segunda Guerra Mundial, los investigadores e inventores de la ingeniería y la ciencia comenzaron a reconocer la importancia de la información al tratar de descifrar códigos o implementar operaciones logísticas. La investigación y el desarrollo científico, basándose en los éxitos obtenidos, se concentró en “la enorme tarea de hacer más accesible nuestro fabuloso cau-

* Este capítulo ha sido escrito por Martin Hilbert, de la Cepal.

dal de conocimiento” (Bush, 1945). Estas aseveraciones se basaron en los logros de la ingeniería alcanzados antes y durante la guerra, que no se pueden separar de nombres como Claude Shannon, Alan Turing, John von Neumann y Norbert Wiener, entre otros. Todos ellos eran matemáticos, que buscaban la manera de instrumentar y automatizar el conocimiento de las matemáticas en procesos que estuvieran inmersos en las diversas soluciones técnicas.

El punto de partida fue la separación de dos sentidos para el término información: el significado de información (la semántica) y los símbolos que representan la información de la manera más eficaz (la sintaxis). Los ingenieros se concentraron en lo segundo, para volver a lo primero algunas décadas más tarde. Esta era la manera natural de hacerlo, ya que el método científico estipula que se debe estudiar la complejidad de la realidad en partes, y el proceso funciona mejor cuando se hacen preguntas concretas consecutivas como: *¿por qué cae una manzana al suelo?*, para luego explicar en qué consiste la fuerza de gravedad, en lugar de hacer preguntas generales: *¿cómo funciona el universo?* De esta manera, el enfoque científico comienza de manera simple al investigar cuál es la forma más eficaz de representar la información con símbolos, sin prestar atención al significado o valor de la información al principio. Sin embargo, este método científico más tarde condujo a una mejor comprensión de temas complejos, como qué son el conocimiento y la inteligencia.

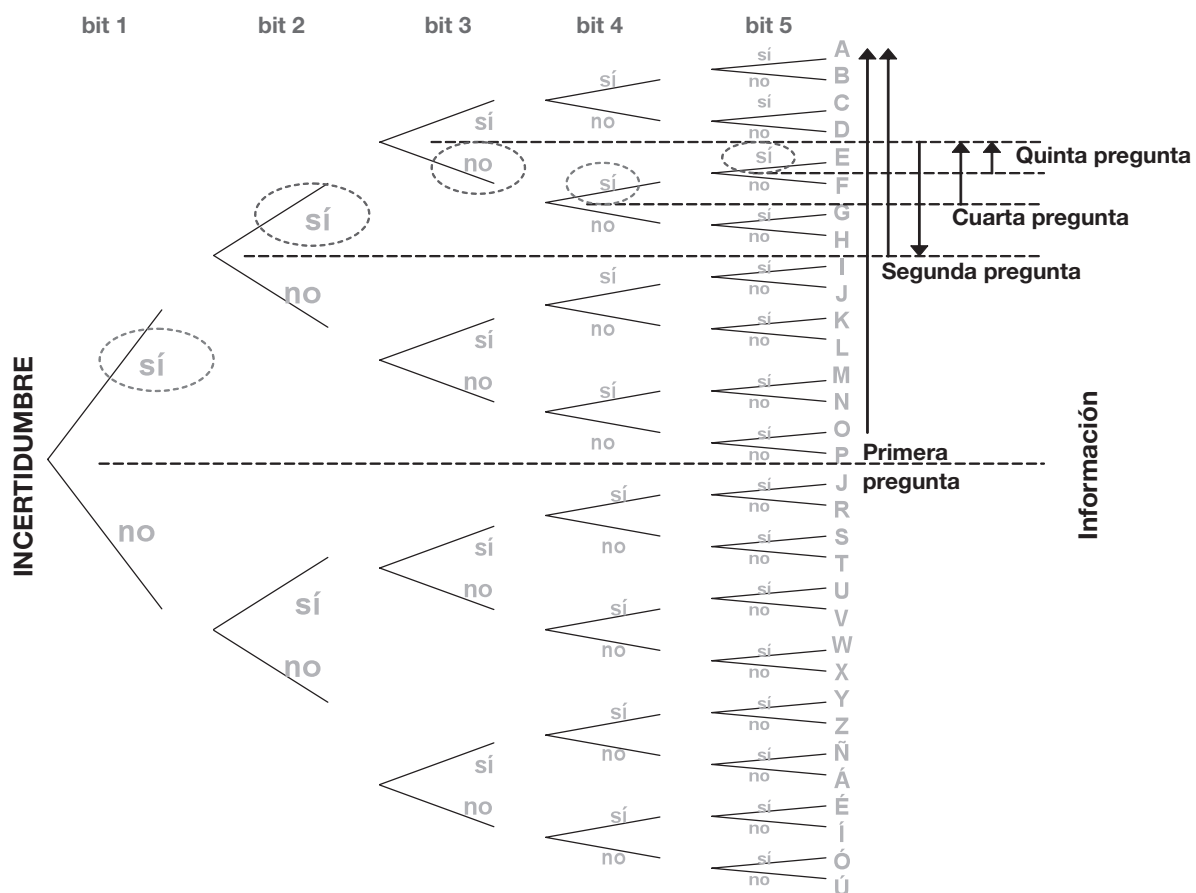
La pieza clave de la simbolización de la información es el *bit*, el dígito binario, la manera más idónea de codificar información. “Un *bit* no tiene color, tamaño o peso, y puede viajar a la velocidad de la luz... Es un estado: encendido o apagado, verdadero o falso, arriba o abajo, adentro o afuera, negro o blanco” (Negroponte, 1995). Los científicos acordaron denominar a estos dos estados como 1 y 0, aunque fue una decisión arbitraria y también se los podría haber llamado *sí* y *no*, *arriba* y *abajo*, *atrás* y *adelante* o *rosado* y *9*. El padre de la actual teoría de la información, Claude Shannon (1948), prefería explicar la influencia del *bit* mediante la descripción del juego de las veinte preguntas, un juego para niños en el que alguien piensa el nombre de una ciudad y otra persona puede hacer veinte preguntas que se responden con un “sí” o un “no” para intentar llegar a la respuesta correcta. En Estados Unidos hay alrededor de 14.000 ciudades con más de 500 habitantes, y existe la posibilidad de que la pregunta *¿es Berkeley el nombre de la ciudad?* sea la respuesta de la suerte, pero las estadísticas demuestran que nombrar una ciudad tras otra no representa la mejor estrategia. Shannon comprobó matemáticamente que la manera más eficaz es dividir el espacio por la mitad de modo consecutivo, como por ejemplo con la pregunta *¿está la ciudad al este del Misisipi?*, porque así se está dividiendo al país justo por la mitad. La pregunta siguiente podría ser: *¿está al norte del río Arkansas?*, ya que también así se divide al país en dos. La respuesta siempre es “sí” o “no”, que se pueden representar por 1 y 0. Con 20 respuestas se obtienen 20 *bits* de información, que a su vez corresponden a 1.048.576 alternativas igual de probables (es decir, 20 preguntas que se respondan con sí o no, es igual a 2^{20}). Esta fórmula debería servir para identificar cualquier ciudad en todo el mundo. Como la incertidumbre es lo contrario de la información y el método sí-no es el más eficaz para disminuir la incertidumbre, la transmisión de información mediante el código binario es la manera más eficaz de trans-

mitir información. Cuando se habla de digitalizar información, significa que cualquier tipo de información se convierte utilizando el código binario 0 o 1, y la unidad de almacenamiento más común es el *byte*, que equivale a 8 *bits*, es decir, ocho decisiones consecutivas entre “sí” y “no” que resultan en una rama de decisiones con $2^8 = 256$ posibles combinaciones.

Siguiendo este esquema, se podría extender el juego de las veinte preguntas desde los nombres de ciudades a cualquier palabra, y comenzar a preguntar de forma consecutiva sobre cada letra que la compone. Si se tienen en cuenta las letras del alfabeto en español y se le agregan las vocales acentuadas, se obtiene un total de 32 letras. Se podría comenzar preguntando si la letra buscada está entre las primeras 16, y con cada pregunta se estaría reduciendo la incertidumbre a la mitad (véase el gráfico 2.1). De esta manera harían falta 5 *bits* para codificar todas las letras en cuestión; por ejemplo, la secuencia “sí-sí-no-sí-sí” representaría la letra “e”. En el código binario, se podría representar como “11011”, es decir, cinco símbolos, que es más eficaz que 32 letras.

Gráfico 2.1

**EJEMPLO DEL CÓDIGO BINARIO: LETRAS DEL ALFABETO CASTELLANO
CON IGUAL PROBABILIDAD DE DISTRIBUCIÓN**



Estas decisiones entre “sí” o “no” pueden ser representadas de diferentes maneras en las soluciones tecnológicas, como por ejemplo con la existencia o no de corriente eléctrica o luz dentro de un cable de fibra óptica. Como Shannon (1948) demostró matemáticamente, el código binario representa la manera más eficaz de codificar información. Es tan efectiva que se utiliza cada vez más para las fotografías, voces y sonidos, imágenes con movimiento y todo tipo de datos. Dicho de otra manera, la forma en la que representamos información es una “convergencia” encaminada hacia el paradigma digital. Este es el motor que mueve la tan analizada convergencia de las TIC, en la que la radio, la televisión, la telefonía fija y móvil, e internet se fusionan en una red digital armoniosa.

El efecto más potente de convertir información al código binario es que permite realizar las cuatro operaciones básicas mediante el mismo formato de representación. Las cuatro operaciones más básicas son: la captación y adaptación, es decir, reproducir información de un formato a otro, como por ejemplo en sensores y monitores; la transmisión, es decir, reproducir en un punto un mensaje seleccionado en otro punto (las telecomunicaciones son buenos ejemplos –*tele* significa *distancia* en griego–); el procesamiento, es decir, la manipulación según un procedimiento, como cuando se usa una calculadora; y el almacenamiento sin perder información, como en un libro. Estas cuatro funciones están estrechamente ligadas, son interdependientes, y comparten la característica de ser digitales. Como este hecho rompe por primera vez la histórica barrera que las dividía, evolucionaron hacia la importante tecnología de uso general que hoy se conoce como “tecnologías de la información y de la comunicaciones” o TIC. La fuerza motora y unificadora detrás de esta tecnología es la idea de trabajar con la información en formato digital. La convergencia de las TIC está creando una red armónica entre estas funciones básicas, que constituye la infraestructura esencial del paradigma digital. Por supuesto, el quinto componente es clave en la esquematización completa de los procesos informáticos y comunicacionales: se trata del cerebro humano y sus funciones.

A continuación se presentan las cuatro operaciones informáticas básicas. En cada sección se comienza con un resumen histórico y teórico del sistema tecnológico en cuestión, y luego se analizan algunos de los efectos más importantes que ha tenido esta tecnología. Al final de cada sección se resumen los aspectos que serán explicados detalladamente en capítulos sobre los estados más avanzados de cada operación informática. En la sección final se investigan las repercusiones de la convergencia entre las diferentes partes del sistema de TIC en su totalidad, un análisis que continúa en la última parte del libro.

b. Captación y adaptación de información

Para poder trabajar con información es necesario capturarla con sensores y presentarla mediante interfaces. De esta manera la información se adapta de un formato a otro y se puede difundir, almacenar o manipular. En el paradigma digital, la información se adapta al formato binario, es decir, una serie de números 1 y 0. Se podría afirmar que la información es “producida” de esta manera, ya que anteriormente se pre-

sentaba en un formato diferente y ahora está disponible en un formato tecnológico que permite que algún agente trabaje con ella. En este sentido, la interoperación se define como la adaptación de información de un formato a otro, por ejemplo $A \Rightarrow a$, con el fin de modificar lo menos posible el contenido y el significado de esa información y de mejorar la utilidad en un nuevo formato. El compás náutico del siglo XII y el termómetro de mercurio de 1714 son dos ejemplos ilustrativos, que pueden ser catalogados como tecnologías de la información y de las comunicaciones. Cumplen la función de capturar la información disponible (el campo magnético terrestre o la velocidad del movimiento de las moléculas en el aire) y adaptarlo a un formato útil para orientar al usuario. Con esta adaptación, un nuevo grupo de agentes, en este caso humanos, pueden trabajar con esta información.

Existen diferentes tipos de sensores para capturar información. Por lo general, se trata de dispositivos que detectan o miden manifestaciones físicas o fenómenos como luces, sonidos, energía, velocidad o aceleración y los convierten en una señal que representa la información captada. Son una suerte de traductor que transforma la magnitud del sujeto que está siendo medido en una señal cuantificable. Los sensores pueden ofrecer una indicación directa, como en el caso de un termómetro, o indirecta, como en el caso de un aparato que convierte lo analógico a digital. Una de las características más notables del paradigma digital es la cada vez mayor cantidad de información que producen los sensores sin la intervención directa de los seres humanos. Unas décadas atrás, casi toda la información que era captada en soluciones digitales como el papel o las grabaciones, era creada por una persona. En el paradigma digital, se capta una gran cantidad de información sin la participación humana, que es luego preanalizada por una inteligencia artificial antes de que una persona la utilice.

Hay un sinnúmero de interfaces de naturaleza audiovisual, háptica y, últimamente, cerebral para desplegar información. En su estudio histórico Man-Computer-Symbiosis de 1960, Joseph Licklider plantea que las computadoras deberían operar junto con el usuario en la toma de decisiones y el control de situaciones complejas, sin una dependencia inflexible o programas predeterminados. Para facilitar esa interacción entre humanos y computadoras, identifica diez problemas prioritarios que deberían ser resueltos, entre ellos la creación de interfaces para símbolos que ingresan y salen; la elaboración de sistemas de reconocimiento de voz y escritura manual directa; y el desarrollo de sistemas que comprendan la sintaxis y la semántica del lenguaje natural. Casi cincuenta años más tarde, la mayor parte de los temas que planteó Licklider han sido resueltos de manera relativamente exitosa.

Entre las características más importantes para la evaluación socioeconómica de las interfaces están el efecto candado y los costos de cambio (*lock-in* y *switching costs*). Una vez que un usuario se ha acostumbrado a una interfaz, los costos de cambio pueden ser muy elevados, porque los aspectos complementarios lo atrapan en ese tipo de esquema. Los costos de cambio inciden sobre las trayectorias y estrategias tecnológicas, porque el usuario naturalmente tratará de minimizarlos y, por tanto, optará por actualizaciones similares. El efecto candado es conocido como la clave del éxito en el mercado de algunos productos de *software*, especialmente entre las opciones de sistemas operativos.

Como se explicará en el respectivo capítulo, la tendencia actual es la de una simbiosis cada vez más perfecta entre los seres humanos y sus máquinas. Desde los años sesenta los implantes cocleares han ayudado a más de 60.000 personas sordas o semi-sordas a comunicarse mejor. Hace más de una década que decenas de parapléjicos interactúan con el resto del mundo mediante interfaces cerebrales directas. En ese tipo de soluciones, los sensores detectan la actividad cerebral y las interfaces la convierten en un código binario que les permite a estas personas –quienes han incorporado elementos robotizados– navegar en internet con el impulso de sus pensamientos.

c. Transmisión de información

Una vez que la información ha sido adaptada al código binario, este formato es extremadamente eficaz para su transmisión. Las ideas de Shannon fueron la inspiración para este avance, y afortunadamente él no tuvo el mismo destino desdichado de muchos otros grandes pensadores de la humanidad, ya que pudo ver los resultados de su trabajo. Falleció en 2001, después que ya había pasado la euforia de las compañías “punto com” de los primeros años de existencia de la red, lleno de honores y admirado como el legendario fundador de la era digital. Es interesante observar que Shannon era uno de los principales adherentes a la teoría del “empuje tecnológico” como explicación para los cambios en esa área, en lugar de respaldar la postura mucho más extendida que explica el progreso técnico sobre la base de la teoría de “inflación de demanda”. Shannon expresó: “Siempre he estudiado lo que me interesa sin prestar mucha atención a la posible remuneración o al valor que pudiera tener para el mundo. He pasado mucho tiempo trabajando en cosas totalmente inútiles” (Von Baeyer, 2004). Shannon experimentó con misteriosas máquinas para leer la mente, uníclulos, extraños instrumentos musicales, saltadores a gasolina, y cuchillos con cien hojas, mientras también se tropezaba con la idea de la teoría de la información, que en pocas décadas condujo a innovaciones como las que implementan las empresas Amazon, Chilecompra, Skype y Second Life.

Shannon (1948) demostró que la parte receptora puede obtener la información deseada mediante un sistema que defina cuáles preguntas se deben hacer en cuál secuencia. La codificación se apoya en el hecho de que algunas cosas son más probables que otras, lo que define a la información como lo opuesto de la incertidumbre. Si el receptor de un mensaje determinado conoce las probabilidades de su continuación, no es necesario comunicarlo por completo. Es redundante enviar el resto del mensaje, dado que el receptor ya se puede imaginar como... En este sentido, con un cálculo detallado de probabilidades en ambos lados de la comunicación, puede no ser necesario transmitir toda la información para poder reconstruir el mensaje. El receptor puede deducir con bastante certeza cuáles son las letras omitidas. Si el emisor y el receptor son “gemelos” (una analogía utilizada por Shannon), y ambos conocen exactamente las probabilidades de un grupo de mensajes, pueden comunicarse mucho más eficientemente, dado que no necesitan transmitir las partes del mensaje que pueden ser completadas por cálculos probabilísticos. En el lenguaje formal, se dice que la información sobre las probabilidades del contenido de un mensaje es la “re-

dundancia” del mensaje. Dado que ambos lados conocen la “estructura” del idioma utilizado, es redundante mandarlo. Por ejemplo, para dos gemelos mexicanos sería suficiente comunicar las palabras: “canta y no...”. Las probabilidades que la próxima palabra sea “llores” es muy alta. Claro que en caso de que la próxima palabra no sea “llores”, es necesario que el gemelo emisor avise a su compañero receptor (lo que no es un problema, dado que el gemelo emisor puede imaginarse lo que espera su gemelo receptor, ya que ambos calculan las mismas probabilidades). En términos muy simplificados, ésta es la lógica básica como uno se puede imaginar que funciona la comunicación entre un emisor y un receptor en internet. Son gemelos digitales que manejan probabilidades para optimizar la eficiencia de la comunicación.

La definición de información en términos de probabilidades es el corazón de la teoría de la información moderna; sin embargo, existen otros aspectos a considerar. Los códigos que son eficaces en la transmisión de la información abarcan desde lo más probable hasta lo menos probable. La información sobre la frecuencia de diferentes letras en un idioma, permite adaptar estas letras de forma efectiva al código binario. Para poder adivinar las letras de una palabra en inglés (tal como en el juego rueda de la fortuna), uno no comenzaría preguntando si contiene la letra *Z* –la menos frecuente en ese idioma, con una probabilidad de aparecer del 0,08%–, sino que preguntaría si contiene la letra *E* –la más común en el idioma inglés, con una probabilidad de aparecer del 13,1%–. Por tanto, si un operario desea reducir el nivel de incertidumbre, es decir, recibir información, deberá preguntar primero sobre la opción más probable si es que desea utilizar un medio de comunicación efectivo. Para quien va a transmitir esa información, hacerlo de modo eficaz significa que deberá simplificar la manera de enviar los caracteres más frecuentes, lo que se puede lograr asignando símbolos cortos a las letras más comunes y símbolos largos a las menos frecuentes. Por eso es que Samuel Morse escogió un solo punto para representar la letra *E* en su famoso código. Morse no tenía la misma formación de Shannon en matemática, pero tenía sentido común y organizó en 1838 su código acorde con el número de letras que contó en cada compartimiento de la imprenta de un periódico local. Presumió que las décadas de experiencia habían llevado a un ajuste entre la oferta y la demanda, y encontró que la *E* era la letra más frecuente, seguida de la *T* que es representada por un guión –según las estadísticas modernas, la letra *T* es la segunda más frecuente en el idioma inglés, con una probabilidad de aparecer del 10,5%.

Shannon destacó que la naturaleza de la información determina que un símbolo siempre depende del anterior. La secuencia “*and*” seguramente aparece más veces en el idioma inglés que la secuencia “*anz*”. Al agrupar letras en bloques o palabras se permite asignarles un símbolo; además, las reglas de la gramática señalan las probabilidades, como las combinaciones de artículos y sustantivos. Si el receptor y el emisor del mensaje conocen estas probabilidades, se elaboraría un código más eficaz. Se pueden codificar combinaciones de palabras y oraciones enteras con simples símbolos, como se hizo con el famoso código *SOS*. Los teóricos lo llaman codificación de bloques, y lo usan a diferentes niveles para reducir a un mínimo la cantidad de símbolos en la transmisión de un mensaje. Es posible llevar la identificación del grado de probabilidad hasta el extremo. Se puede demostrar estadísticamente que la primera frase

de este libro influye sobre la última oración, comenzando por reconocer el idioma en el que ambas están escritas; pero incluso se puede ir más allá, y utilizar este dato para optimizar la codificación de la información que el libro contiene.

Encontrar el mejor código para diferentes mensajes es uno de los principales objetivos a la hora de transmitir información. Otro problema complejo es el de encontrar la manera más adecuada de modular los símbolos en una solución tecnológica, que se puede lograr mediante señales de humo, sonidos de trompeta o de tambores, la corriente electrónica, ondas de luz o de radio, y otros métodos. Es de conocimiento general que la fibra óptica es el medio por el que se transmiten más velozmente estos símbolos simples, ya que el símbolo que representa *sí* o *no* puede viajar a la velocidad de la luz en este tipo de red, y se sabe desde el tiempo de Einstein que la velocidad de la luz es el modo más rápido de transmitir información.

Un tercer desafío es la existencia de ruido en las comunicaciones, y se entiende por ruido a la incertidumbre que causan las imperfecciones de los instrumentos y los observadores en cualquier medición. Si no distinguimos entre dos sonidos o los colores de las fotos, esto se debe al ruido. Esta interferencia es natural e importante, porque si no existiese sería imposible para nosotros reconocer objetos concretos de la manera que lo hacemos (Von Baeyer, 2004). Como se verá en el próximo capítulo, demasiados detalles pueden distraer de la información que lleva un cierto mensaje, y cualquier distracción en la medición es negativa cuando se pretende transmitir un mensaje concreto. En lugar de filtrar el ruido en la información, Shannon propuso mecanismos que funcionaran con métodos sofisticados para incorporar controles e información adicional. “En realidad, todo el problema de la comunicación eficiente y libre de errores se reduce a remover de los mensajes la redundancia que contengan, y añadirles la repetición correcta que permita corregir los errores que se hayan cometido en la transmisión” (Pierce, 1980). En otras palabras, con su teoría Shannon plantea reducir al mínimo el componente del mensaje que no reduce la incertidumbre de la parte receptora (la llamada redundancia), es decir, quitar las cosas que el receptor ya sabe –que no representen información para el receptor– y agregar otros datos para asegurarse de que la información que esa parte todavía no tiene, llegue de forma correcta. Esta es la idea básica detrás de la transmisión digital de información.

La transmisión digital de la información posee varias características que pueden derivar en la reorganización de diversos mecanismos sociales y económicos de coordinación. Por ejemplo, en el formato digital la información puede ser transmitida en *tiempo real*, que es la velocidad de la luz, lo que acelera enormemente la comunicación. La nueva forma de transmitir información permite ejercer la tan mencionada nueva gestión de tiempo y espacio, que sólo está restringida por el medio de procesamiento (el ancho de banda y la extensión de la red). De esta manera, la información y los productos y servicios digitalizados llegan a *la muerte de la distancia*.⁵ En

⁵ En 1995, *The Economist* publicó un influyente y desafiante artículo de Francis Cairncross titulado *The death of distance* (La muerte de la distancia), que aborda el efecto de las telecomunicaciones e internet en las distancias geográficas: “El costo de las comunicaciones probablemente será la fuerza económica más importante que moldeará la sociedad en la primera mitad del próximo siglo” (Cairncross, 1997, p. 1).

cambio, la información no digital continúa estando sujeta a las leyes de la naturaleza para ser trasladada.⁶ Actividades vinculadas a las deliberaciones, las compras, las transacciones financieras, las votaciones, la música, las películas, los juegos, y muchas otras, son todos procesos digitalizables, y que también pueden llegar a la muerte de la distancia.

Otra característica del intercambio digital es la naturaleza de las *redes multidireccionales* (Shapiro y Varian, 1999). Al contrario de lo que ocurre con las comunicaciones unidireccionales o bidireccionales (*de uno a varios*), las estructuras de comunicación multidireccional permiten que la información circule en la comunicación global individual (*de uno a uno*) y también entre muchos puntos al mismo tiempo (*de varios a varios*). Por ejemplo, el correo electrónico o las videoconferencias se pueden utilizar como medio de comunicación en todas las direcciones mencionadas. Al contrario de lo que ocurre con las cartas escritas en papel, los mensajes de correo electrónico se pueden enviar *de uno a uno*, *de varios a uno* y, gracias a la no rivalidad de los *bits*, también *de uno a varios* y *de varios a varios*. Los cuatro canales de comunicación se pueden utilizar ahora al mismo tiempo de forma muy rápida y práctica pero, sobre todo –por primera vez en la historia de las comunicaciones– en un solo medio armonizador, es decir, sin la necesidad de cambiar el medio de transmisión de la información (véase el cuadro 2.1 “Variantes de la comunicación”).

La comunicación desde *varios hacia varios* puede tener una topología en forma de estrella, cadena, anillo o red, y estas conexiones multidireccionales están sujetas a *externalidades* (Shapiro y Varian, 1999; Kelly, 1997): cuantos más usuarios estén conectados, mayor es el valor de la red para cada participante. La red influye en la información, cuyo beneficio para el consumidor cobra más importancia a medida que aumenta el número de consumidores que utilizan esa información. Este es un concepto extraño para un economista, porque desde el tiempo de Adam Smith ha sido la ley de la escasez que ha guiado el análisis económico; por ejemplo, si una manzana es

Cuadro 2.1
VARIANTES DE LA COMUNICACIÓN

	Desde uno	Desde varios
Hacia uno	Conversación telefónica, carta personal	Votación, aplauso, sondeo, subasta
Hacia varios	Imprenta, radio, televisión, cátedra, campañas por correo, correspondencia informativa	Reuniones, chats, foros electrónicos, <i>software</i> para grupos, listas de correos electrónicos, audio y videoconferencias

⁶ Sobre la introducción y análisis general de los conceptos de “bienes digitales y no digitales”, véase Departamento de Comercio de Estados Unidos (1998, 1999 y 2000).

compartida entre tres en lugar de dos consumidores, más bajo será el costo para cada individuo. En las redes, sin embargo, ocurre lo contrario. Cuando Graham Bell inventó el teléfono en 1876, el valor de la red era muy limitado, y con dos aparatos sólo podía comunicarse con su asistente Watson. Pero cuando conectó el tercer teléfono, la comunicación ya era posible en seis direcciones, con el cuarto teléfono, era posible en doce direcciones, y así sucesivamente. El valor de la red, por tanto, aumenta con el ingreso de cada nuevo participante; para ser más precisos, se incrementa con la función (X^2-X) . Por eso es que las empresas comerciales que funcionan desde internet intentan conseguir cada vez más clientes en sus redes; así multiplican las ganancias exponencialmente. El hecho de que compañías como Skype, YouTube o Second Life tengan un valor de millones de dólares no se debe a la tecnología que utilizan para sus servicios, sino exclusivamente a las vastas “externalidades” de su base de usuarios. Son las “externalidades” de estas redes lo que cuenta, y lo que aumenta su valor de forma exponencial.

En la actualidad las diferentes redes están convergiendo hacia una común, debido a la superioridad del formato de dígitos binarios para transmitir información. Este proceso está llevando a la denominada convergencia de todos los estándares anteriores de redes, como los de radioteledifusión (*broadcast*), voz o datos. Las implicaciones técnicas de esta convergencia derivan en cambios tecnológicos gigantescos, incluso alteraciones radicales en la arquitectura de redes, en los protocolos de operación y en la integración de las diferentes funcionalidades de las redes. Esto significa que se deberán efectuar importantes inversiones para actualizar las redes o para instalar nuevas, en un proceso que conduce a lo que se conoce como las redes de siguiente generación (NGN, por su sigla en inglés), que están estructuradas totalmente sobre la base del protocolo de internet (IP, por su sigla en inglés). El concepto de NGN consiste en crear un esquema por medio del cual todos los servicios de comunicación sean suministrados en una sola red de intercambio de paquetes de información digital. Por tanto, las diferentes redes que se han construido en todo el mundo están convergiendo en la red de redes, que asegura que un gran caudal de información puede ser transmitido de la manera más eficaz. Los innumerables sensores e interfaces como la radio, la televisión, los satélites, el teléfono, el correo y otros, están todos conectados en la misma red, al mismo tiempo que ofrecen diferentes servicios para diversos propósitos.

d. Procesamiento de información

En su juventud, Shannon también tuvo un papel importante en la investigación sobre cómo la información en formato binario puede ser procesada y transformada. El objetivo no es adaptar información de $A \Rightarrow B$ a ni transmitirla en el sentido de $A \Rightarrow A$, sino que convertir $A + A = B$. En su tesis de magíster (posgrado), que ha sido catalogada como la más importante y también la más famosa del siglo pasado, Bañón demostró, cuando era estudiante del Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT) en 1937, que el álgebra *booleana* y la aritmética binaria se podían utilizar para simplificar el esquema de interruptores electromagnéticos, que en ese entonces funcionaban dentro de las consolas de una central telefónica. Luego, invirtió el concepto y también

demonstró que debería ser posible utilizar el esquema de los interruptores para resolver problemas de álgebra *booleana*, y propuso usar las propiedades de los interruptores eléctricos para ejecutar ejercicios de lógica.

El matemático y filósofo británico George Boole publicó en 1854 *An investigation of the laws of thought on which are founded the mathematical theories of logic and probabilities* (*Investigación de las leyes del pensamiento en las cuales están basadas las teorías matemáticas de la lógica y de la probabilidad*). Boole señaló que había una clara analogía entre la manera en que el álgebra manipulaba los símbolos, y esos símbolos que pueden representar formas lógicas y silogismos. Los dos pilares básicos de la lógica son las llamadas operaciones NOR –ni X ni Y es verdadera– y operaciones NAND –no son todas verdaderas–. Todos los demás tipos de procesos de información *booleanos* pueden ser creados mediante una combinación adecuada entre estas dos. Por eso es que se las llama compuertas universales y se las puede construir con interruptores, transistores u otros dispositivos que transformen un símbolo de manera controlada. Si se utiliza la simbolización de información más básica, el dígito binario, dos símbolos pueden tener cuatro combinaciones básicas (*falso-falso, falso-verdadero, verdadero-falso, verdadero-verdadero*), que se pueden convertir de un estado a otro a través de las compuertas NOR y NAND. Este tipo de compuertas lógicas representan el diseño básico de lo que hoy conocemos como *hardware*. Las operaciones lógicas, es decir, la transformación intencional de la información, se pueden realizar con cuentas de madera, como en el ábaco, con tubos de vacío, transistores o dispositivos semiconductores que controlen la cantidad de voltaje que se envía a través de ellos como, por ejemplo, los de silicio. La funcionalidad más importante es el control de lo que entra y lo que sale. Una computadora digital moderna ordena secuencialmente millones de operaciones de ese tipo. Se la llama digital porque se basa en los dígitos binarios, es decir, convierte una cierta combinación de datos en otro tipo de información. La suma de varios transistores en uno o muy pocos paquetes de gran tamaño de circuitos integrados es lo que se llama microprocesador. Esta innovación de sistema redujo enormemente el costo del dispositivo y por tanto permitió el diseño de secuencias mucho más complejas de compuertas lógicas, en lo que se constituyó como el nacimiento de un nuevo paradigma tecnológico. Por esta razón algunos investigadores toman la fecha de invención del microprocesador (1973) como el comienzo de la onda larga digital.

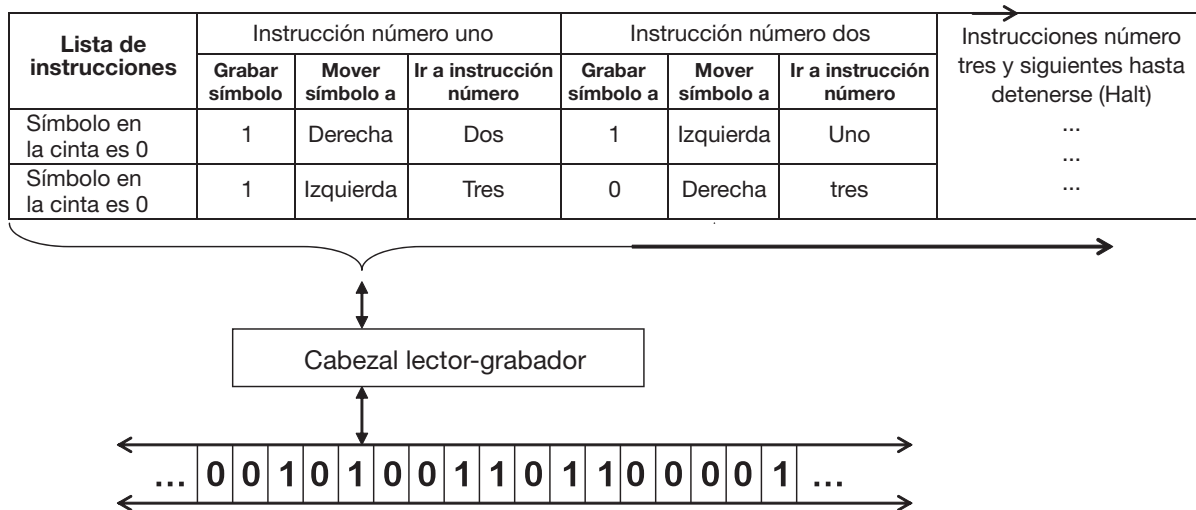
El mismo año en que Shannon demostró cómo implementar el concepto de compuertas lógicas en dispositivos electromecánicos, el matemático inglés Alan Turing (1937) publicó un estudio sobre números computables, aplicables al *Entscheidungsproblem*, que era una extensión del trabajo que había realizado de manera independiente Alonzo Church en la misma época (1936). El *Entscheidungsproblem*, que en alemán significa “problema de decisión”, es un reto que planteó el matemático David Hilbert, quien se hizo famoso por idear problemas que marcaron el curso de la matemática en el siglo XX. En este caso preguntó si era posible establecer un procedimiento efectivo de información, un algoritmo, que tuviera como base una frase y la clasificara de *verdadera* o *falsa* según fuera el caso. Un algoritmo, o procedimiento efectivo, es una lista pormenorizada de instrucciones, en la que cada instrucción estipula exac-

tamente cuál operación debe realizarse a continuación, al definir la secuencia en la que se deben alinear las compuertas lógicas de Boole. Mediante un programa de *Entscheidungsproblem* se debería poder determinar si una cierta hipótesis o teorema es verdadero o falso, y seguramente sería de gran ayuda en lo que conocemos como el método científico. El análisis de Turing tuvo una gran influencia del trabajo de Kurt Gödel (1931) sobre la naturaleza incompleta e incongruente de todo el conocimiento del universo. La manera en la que Gödel demostró los límites de lo que se puede saber fue con la creación del equivalente matemático de estas dos frases: a) La siguiente frase es verdadera; b) La frase anterior es falsa. Después de un momento de consideración, se deduce que esto es una paradoja y que está incompleta o es incoherente. Gödel demostró que este tipo de paradojas existe en cualquier sistema en el que se utilicen reglas para razonar, como en la matemática o el lenguaje. Cuando los seres humanos utilizan símbolos para pensar sobre el mundo, por ejemplo, en la forma de lenguaje, el planteamiento de Gödel también se aplica a los límites de nuestra habilidad para razonar.⁷ Por eso no debe sorprender que Turing observó que el teorema de lo incompleto de Gödel también se aplica a las máquinas inventadas para manipular símbolos.

Con este fin Turing creó un modelo de máquina que podía computar información. La llamada máquina de Turing es un dispositivo que puede procesar símbolos abstractos que, a pesar de su simpleza, se adaptan para simular la lógica de cualquier computadora que se construya. Una máquina de Turing consiste de un cabezal que lee e imprime en una larga cinta dividida en un número infinito de cuadrados que ocupan un cierto espacio. El cabezal reconoce el símbolo de un cuadrado, luego consulta con una lista de instrucciones sobre qué operación ejecutar, borra el espacio del cuadrado y lo reemplaza con el nuevo símbolo, según la determinada operación de lógica. La lista de instrucciones, el algoritmo, también le indica al cabezal si debe ir a la izquierda o la derecha después de esta operación, y luego el procedimiento empieza de nuevo con otro cuadrado. Por supuesto que se podría mover la cinta en lugar de mover el cabezal. Si el cabezal lee *0* y la operación lógica sería *No 0*, este número resultaría reemplazado con un *1* y se movería hacia la izquierda o la derecha, según lo indique la lista de instrucciones. Las instrucciones obedecen al siguiente formato: *si se lee 0, escribir 1, moverse hacia la derecha e ir hacia la próxima instrucción*. De esta manera se pueden ejecutar operaciones lógicas al leer, convertir, escribir y continuar. Como la lista de instrucciones tiene fin y ordena exactamente qué hacer para cada situación y cada símbolo, proporciona un algoritmo que le comunica a la máquina claramente qué hacer hasta que alcanza un cuadrado que le ordena detenerse. Con este aparato extremadamente simple es posible realizar cualquier cálculo que pueda hacer una computadora digital. En realidad, con cualquier programa de computación

⁷ El físico Roger Penrose (1989) se ha hecho famoso por sostener –sobre la base de la teoría cuántica– que la idea de Gödel no se puede aplicar al pensamiento consciente de la mente humana, y ha dado origen a un importante debate entre expertos de la neurociencia, la física, la lógica y la filosofía que decididamente es mucho más amplio que el alcance de este libro.

Gráfico 2.2
PRESENTACIÓN GRÁFICA DE UNA MÁQUINA DE TURING



se puede crear una máquina de Turing. Esta verdad es llamada hoy la tesis Church-Turing (gráfico 2.2).

Esto, por supuesto, no significa que se debe crear una lista explícita de instrucciones que incluya todas las secuencias posibles, ya que se puede definir una especificación sin enumerarla de manera exhaustiva. Un buen ejemplo es el de la función para obtener la raíz cuadrada en una calculadora. Cuando se ingresa el número positivo X en una calculadora, la acción correcta es mostrar un número positivo Z como $z^2=x$, con una aproximación de por ejemplo 15 espacios decimales. Para esta especificación, el diseñador no está obligado a elaborar una tabla de raíces cuadradas. Isaac Newton describió un procedimiento simple en el siglo XVII para llegar al resultado correcto de manera efectiva, repitiendo el programa $[z - (z^2-x)/(2z)]$. Independientemente de cuál fue el número x que se ingresó en la máquina al comienzo, el procedimiento siempre puede comenzar con $z = 1$ (adivinación inicial) y después reemplazar z en la próxima ronda con el resultado de la ronda anterior hasta que (z^2-x) sea menor a 15 espacios decimales. El lector puede probar este procedimiento repetitivo con cualquier número en lugar de imaginarlo. Da satisfacción comprobar lo que las máquinas de Turing, las computadoras, realmente “hacen”, y aunque las usamos siempre, no muchos recordamos este proceso. Un programa de computación diseñado para ejecutar este procedimiento podría ser así:

```

función SQRT(x)
z ← 1.0      /* adivinación inicial */
repetir hasta  $|z^2-x| < 10^{-15}$ 
    z ← z - (z2-x)/(2z)
fin
retorno z

```

Cuando los ingenieros en informática elaboran programas más complejos, los organizan en unidades pequeñas y completas llamadas subrutinas o módulos, y cada una de ellas se ocupa de una suboperación. Algunas son simples, como el programa para obtener la raíz cuadrada. No obstante, incluso para una operación tan simple, el cabezal y la cinta de la máquina de Turing deberán ejecutar algunas operaciones, especialmente si cada número es representado nuevamente por los dígitos binarios 1 y 0. La elaboración de un programa muy compacto que resuelva problemas complejos, requiere la integración de varias subrutinas y conducirá a un diseño altamente modular que incluya instrucciones en diferentes niveles jerárquicos. Esto no sólo es muy eficaz porque la misma subrutina se puede usar con diferentes fines, sino que también hace al programa más resistente con respecto a fallas o cambios en partes específicas. Estos tipos de programas que contienen diferentes niveles jerárquicos son lo que hoy conocemos como *software*.

Se podría afirmar que los programas de *software* procesan los conocimientos que se les han ingresado, de la misma manera que hemos ingresado el conocimiento de Isaac Newton en la calculadora con la que obtenemos una raíz cuadrada. Si bien hace unas décadas el cálculo de una raíz cuadrada con un resultado de 15 espacios decimales requería una formación intensiva en matemática y a esta habilidad se la consideraba un “conocimiento tácito” que sólo podía alcanzar el ser humano, hoy día cualquier niño puede lograr la raíz cuadrada más compleja al ingresar los datos en la máquina indicada. Utilizando la misma lógica con la que aplicamos nuestro conocimiento de mecánica en una polea y nuestro conocimiento de la termodinámica en el motor a vapor para extender la fuerza de nuestros músculos, ahora estamos aplicando nuestro conocimiento sobre el procesamiento de información y los símbolos en las computadoras, para extender la fuerza de nuestros cerebros. Siempre que sepamos cómo resolver un problema paso a paso, podremos implementarlo en una máquina. De ahí surge la famosa recomendación del científico de la informática John Von Neumann a sus alumnos, en el sentido de que prestaran atención a los críticos de la inteligencia artificial cuando hablan sin cesar sobre todas las cosas que una máquina inteligente no puede hacer. Según Von Neumann así es como se puede construir una máquina para hacer exactamente lo que se ha descrito, siguiendo el procedimiento paso por paso. Uno de los principales problemas que afrontamos es que sencillamente no sabemos “lo que hacemos” cuando estamos *pensando, razonando, o identificando objetos intuitivamente*, entre otras actividades que el cerebro humano puede ejecutar.

La importancia socioeconómica de la computación consiste en la complementariedad de soluciones artificiales con lo máspreciado y místico de la humanidad: su inteligencia. La incógnita sobre la posibilidad de crear máquinas que piensen se ha planteado naturalmente desde los años treinta. En 1950 Alan Turing presentó formalmente lo que más tarde se conocería como el test de Turing: un humano y otro agente, que puede ser humano o máquina, entablan un diálogo y la parte humana intenta determinar si su contraparte es humano o no. Si la persona no puede identificar a la máquina como tal, esa máquina pasa la prueba. Muchos colegas se rieron de Turing cuando aseguró que más adelante existirían computadoras que prácticamente sorteaban el examen. Lo que hace sólo 50 años era una utopía, hoy día cualquier adoles-

cente aceptaría como una tarea solucionable en un futuro no tan lejano. Ya interactuamos con máquinas usando nuestro lenguaje natural y constantemente escuchamos anuncios automáticos, sin preguntarnos si la voz pertenece a una persona o a un robot. Aunque todavía queda trabajo para perfeccionar estos sistemas, ya se ha llegado mucho más lejos como se imaginaba hace unas décadas. Nuevamente somos testigos de la enorme e inimaginable fuerza de los cambios de paradigma y las transformaciones en la escala de valores y *Weltanschauung*.

En ninguna investigación respetable sobre informática se pone en tela de juicio la naturaleza única de la inteligencia humana. Al contrario, se la admira por la inexplicable y misteriosa manera en la que el cerebro desempeña sus funciones. Sin embargo, también ha quedado claro que las computadoras funcionan mucho mejor para desarrollar varias tareas que el cerebro humano no puede realizar. La velocidad con la que pueden ejecutar la lógica basada en reglas, la precisión con la que lo hacen, y su confiabilidad y coherencia, representan una verdadera ventaja con respecto a ciertas operaciones. Actualmente, utilizamos las computadoras y el cerebro de forma complementaria, aunque el alto grado de nuestra dependencia en la inteligencia artificial quedó en evidencia por el revuelo que causó el problema Y2K del 2000, cuando se gastaron miles de millones de dólares para evitar que algunas computadoras se apagarán por sólo unos segundos. Una economía moderna se basa en la combinación correcta de la inteligencia artificial y la inteligencia biológica, y teniendo en cuenta el progreso gradual de la inteligencia humana comparado con el avance exponencial de los sistemas artificiales, generalmente se cree que en proporción seguirá aumentando la importancia de la inteligencia artificial. Esto es lo que sostiene el reconocido teorema de Douglas Hofstadter (1979): cualquier actividad intelectual que se pueda ejecutar con una máquina, pierde relevancia para la inteligencia humana. Un ejemplo actual es la identificación de rostros y personas en controles fronterizos en los aeropuertos del mundo. Las máquinas son incluso mejores (más exactas y potentes) que los seres humanos en la tarea de analizar y “reconocer” las dimensiones y características de una cara (o huella o iris) y lo que la diferencia a una de la otra. El teorema de Hofstadter no significa que la inteligencia humana sea cada vez menos relevante, sino todo lo contrario. Parece que no existe un monto finito de conocimiento, y que la frontera del conocimiento es un blanco móvil. Como parte de esta constante dinámica, la inteligencia humana evoluciona, y por tanto, gracias a su flexibilidad, es el motor permanente del progreso.

Es de conocimiento general que el rendimiento del actual sistema tecnológico ha sido uno de los principales impulsos de todos los demás avances del sistema mayor de TIC. El progreso exponencial durante el paradigma tecnológico del microprocesador se caracterizó por la denominada ley de Moore, y resultó ser una de las innovaciones de “aprendizaje en escala” más duraderas y continuas en la historia del desarrollo tecnológico. Como se analizará en la próxima parte del libro, aunque se hace referencia a una “ley”, no se debe imaginar la trayectoria resultante como un proceso absolutamente determinístico, regular y predecible. Sin embargo, en términos generales, la clave de la innovación continua es la miniaturización, un proceso de innovación estructural. Este modo continuo de mejorar el rendimiento del actual sistema

tecnológico pronto llegará a su fin. Gordon Moore, quien identificó la naturaleza del ciclo de innovación de este paradigma tecnológico en abril de 1965, comentó que “en cuanto al tema de las medidas, se nota que nos estamos acercando al tamaño del átomo, que representa una barrera fundamental, pero pasarán dos o tres generaciones de microprocesadores hasta que lleguemos tan lejos”.⁸ En los próximos 15 años (alrededor de 2020-2025), una capa en un microprocesador debería tener un grosor de no más que unos pocos átomos, lo que neutralizaría la ley de Moore en su significado tradicional. En algunos sectores se afirma que este fenómeno representaría el fin del crecimiento exponencial en el desarrollo del progreso tecnológico de la computación, mientras que en otros sectores recuerdan que el paradigma del microprocesador no es el primero. Como con cualquier otra tecnología, la trayectoria de la computación tiene varios predecesores y no se espera que el paradigma del microprocesador de silicio cese abruptamente su larga evolución, sino que sea reemplazado eventualmente por una tecnología más eficaz, y ya existen varias posibilidades en el horizonte. La opción menos riesgosa para asegurar la continuidad de un rendimiento cada vez mayor en la capacidad computacional, es la de microprocesadores de silicio tridimensionales. Entre otras soluciones posibles está la de incluir varios circuitos en bases moleculares o de ADN. Además, las operaciones computacionales cuánticas ofrecen la esperanza de reemplazar el *bit* binario con un *qubit* de tres niveles, lo que no sólo haría crecer la capacidad de procesamiento de diferentes dispositivos en varias escalas, sino que también introduciría la alternativa del teletransporte mediante conexiones cuánticas. Como demuestran estas soluciones, actualmente se necesitan innovaciones materiales en el campo de la computación, a medida que se acerca el fin de la larga y gradual trayectoria del aprendizaje a escala en torno al silicio. Se están considerando la nanotecnología, la tecnología molecular, la tecnología genética y la tecnología cuántica, lo que muy probablemente también requerirá innovaciones de sistemas y por tanto conducirá a un nuevo paradigma de *hardware*.

Además del *hardware*, otro desafío es el que constituye el desarrollo de *software*, ya que todavía no se ha abordado con suficiente interés el antiguo tema de la computación paralela. Esto incluye un enfoque complementario de sistemas “tradicionales” de inteligencia artificial, basados en la inteligencia programada y la velocidad, y por otro lado mecanismos de aprendizaje computacional, basados en la inteligencia artificial. Con esta investigación se podría llegar a la conclusión de que no se necesita construir una computadora con el esquema de Von Neumann, y que se pueden implementar redes neuronales extensas y potentes, entre otras opciones.

⁸ Manek Dubash Techworld (abril, 2005), “Gordon Moore speaks out: The inventor of what became Moore's Law gives his views on the 40th anniversary of that Law”, <http://www.techworld.com/opsys/features/index.cfm?FeatureID=1353> .

e. Almacenamiento de información

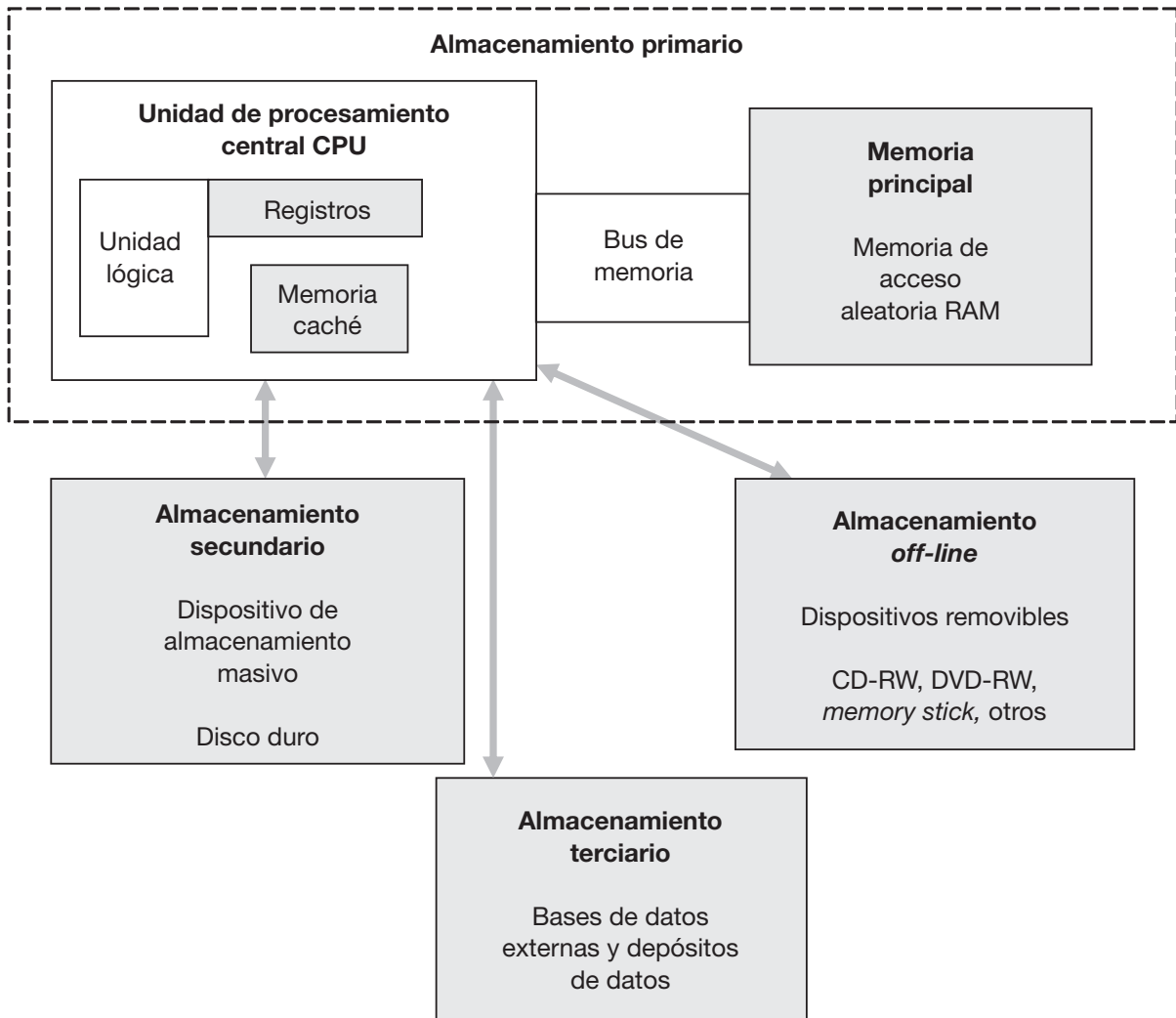
La solución más común para almacenar información ha sido el papel, inventado en China hace más de 2.000 años, y que representó una innovación frente al uso de bloques de piedra y paredes de cavernas, dado que era más liviano y facilitaba la movilidad. El papel aún es uno de los medios principales para guardar información, aunque decididamente presenta desventajas cuando se lo compara con medios modernos para los que se utilizan cargas magnéticas o soluciones ópticas. Estas limitaciones se hacen evidentes cuando se procesa información que está guardada en algún tipo de memoria, por lo que el papel está siendo reemplazado cada vez más por otras soluciones tecnológicas.

La función de la memoria es clave para procesar información, como se deduce al observar el diseño de la máquina de Turing. La cinta debe suministrar los datos y guardar los resultados, y la lista de instrucciones también debe ser almacenada. En este sentido, la tecnología utilizada para el almacenamiento define el rendimiento de la máquina, ya que si se removiera esta función, el dispositivo se convertiría en un simple aparato para procesar señales digitales, como una calculadora tradicional o un reproductor de música o video, y no sería una computadora de acuerdo con la definición que manejamos hoy día. El diseño básico de una calculadora codifica en la estructura de su *hardware* la información sobre cómo sumar, restar, multiplicar y obtener la raíz cuadrada. “Una calculadora de bolsillo no guarda en su memoria la información sobre cómo sumar; esa información está codificada en sus ‘entrañas’” (Hofstadter, 1979). La calculadora sólo se puede usar para las tareas para las que fue diseñada, y no podría reemplazar a un procesador de texto o un videojuego, aunque la mayoría de las calculadoras actualmente tiene incorporadas las funciones computacionales según la definición de Turing. La capacidad de almacenar instrucciones y los símbolos que son procesados de acuerdo con un programa es lo que hace a una computadora versátil y la distingue de las calculadoras tradicionales. A ese diseño también se lo llama “arquitectura de programa almacenado” o “arquitectura Von Neumann” (Von Neumann, 1945). En la actualidad, cuando hablamos de una “computadora”, nos referimos a un aparato con arquitectura Von Neumann (*véase* el gráfico 2.3).⁹

Hasta el momento no existe un medio universal práctico de almacenamiento, y todos los medios disponibles tienen ventajas y desventajas; por tanto, cada sistema computacional contiene diferentes tipos de almacenamiento, cada uno de ellos con un objetivo distinto. Ambos sistemas tecnológicos están estrechamente relacionados. La unidad principal de almacenamiento asume las funciones básicas de asistir a una máquina de Turing, equivale a un pedazo de papel que usamos de borrador durante los diferentes pasos de un cálculo, y está conectado directamente a la unidad de procesamiento. En este sentido, el procesamiento de información depende del alma-

⁹ Sin embargo, esta definición de computadora es algo estrecha y está limitada por el actual paradigma dominante. Las redes neuronales, por ejemplo, no siguen el esquema de Von Neumann pero pueden ejecutar operaciones bastante complejas.

Gráfico 2.3
DISEÑO COMPUTACIONAL Y DE ALMACENAMIENTO
SEGÚN LA ARQUITECTURA DE VON NEUMANN



cenamiento y una función no puede ejecutarse sin la otra. El tiempo que demora la unidad procesadora para leer o grabar información se denomina la latencia de almacenamiento, y es decisivo para la velocidad de computación. En la unidad principal de almacenamiento la latencia se mide en nanosegundos, porque de otro modo la computadora sería tremendamente lenta. Además de la asistencia de la memoria principal, un cómputo necesita registros de procesador, que suministran los datos necesarios para ejecutar la instrucción en ese momento. En la representación gráfica de una máquina de Turing vista desde arriba, se lo observa como la lista de instrucciones. En síntesis, para ejecutar un cómputo, los dos tipos básicos de almacenamiento son la memoria principal, es decir, el papel borrador para anotar los resultados intermedios, y la lista de instrucciones. Se han hecho innovaciones en ambos tipos, como la memo-

ria caché y caché multinivel para mejorar el registro del procesador, o la memoria de acceso aleatorio (RAM), que puede saltar a un punto arbitrario dentro de la memoria principal para leer o grabar un símbolo.

Una de las ventajas de almacenar la información en forma digital es que los *bits* no compiten, es decir, no pueden ser utilizados o consumidos. La información digital siempre se puede leer nuevamente; se la puede dividir, recortar, mezclar o redistribuir, pero no se la puede consumir, lo que permite un sinfín de efectos de escala. Producir información digital puede costar millones de euros (por ejemplo, un programa computacional o una película), pero se puede duplicar con simples órdenes como “copiar” y “pegar”. El costo de la información digital está casi enteramente relacionado a los gastos fijos de su producción, pero los costos variables casi no existen. Esto puede ayudar enormemente en la transparencia de la gestión pública, ya que prácticamente no existen costos adicionales para difundir un documento o informe público entre una o más personas, si se lo almacena, por ejemplo, en una página de internet.

La combinación de transmitir información digital en tiempo real, junto a la posibilidad de contar con un almacenamiento de datos digitales prácticamente ilimitado, conduce a una nueva administración del tiempo en el intercambio de información. Por un lado, la información puede transmitirse en tiempo real, lo que acelera inmensamente el intercambio, y por otro lado, se hace posible el *intercambio asincrónico de información*. Así, la información almacenada puede ser transmitida, procesada o editada con el retraso que se desee. De esta manera se combinan las ventajas de las telecomunicaciones tradicionales con las ventajas del almacenamiento y distribución de la información que tienen los datos impresos y las bibliotecas clásicas. En este sentido, las TIC permiten nuevas maneras de acumular, procesar selectivamente e intercambiar información.

La tecnología magnética ha sido la solución principal utilizada en dispositivos de almacenamiento, mientras que cada vez más se considera la tecnología óptica y el futuro del almacenamiento de información depende del diseño de la red. Por un lado conviene tener la memoria lo más cerca posible al agente procesador, aunque no siempre hay acceso a redes de banda ancha. El costo de la memoria principal es prohibitivamente alto y, junto con los efectos en la red de compartir el espacio de almacenamiento, la tendencia se inclina hacia establecer una memoria para la red. El almacenamiento masivo basado en la tecnología de disco duro se conoce como almacenamiento secundario, y los dispositivos externos con bases de datos o removibles se denominan almacenamiento terciario. Estas son las partes de las redes que pueden ser conectadas a la computadora. Se puede acceder de esta manera a través de una red específica a las grandes bases de datos o depósitos de datos de empresas o entidades académicas. El ancho de banda se vuelve decisivo, lo que demuestra la interdependencia entre los sistemas de almacenamiento y transmisión, y la velocidad de transmisión entre la unidad procesadora y la memoria se convierte así en el principal escollo para la capacidad computacional. Si se pudiera resolver el problema del ancho de banda, no importaría en qué parte de la red se almacena la información. El hecho

de que los *bits* no compiten podría multiplicar su potencia exponencial, como en las conocidas plataformas de comunicación entre iguales (*peer-to-peer*), por ejemplo, Napster, KaZaA, eMule o BitTorrent.

f. Convergencia de las TIC en las cuatro operaciones informáticas

Como se ha analizado en este capítulo, es simplista reducir el paradigma digital a la invención del microprocesador o cualquier otra innovación digital en particular. La selección de fechas para definir paradigmas siempre es arbitraria y al final hay que inclinarse por una fecha en lugar de otra, pero claramente una característica muy importante para la actual evolución de los sistemas de TIC son “las innovaciones que surgen de la integración de dos o más tecnologías simbióticas cuando se intenta simplificar la estructura general del sistema tecnológico” (Sahal, 1985a). Como siempre, el paradigma científico de la era digital nació primero, y provocó un cambio de mentalidad de los científicos, que se concentraron en una serie específica de problemas. La idea de representar información en dígitos binarios para su transmisión, procesamiento, almacenamiento e interoperación, condujo a varias innovaciones de sistemas en las décadas siguientes, y la mayor parte de ellas eran muy interdependientes y se apoyaban unas en otras. Su convergencia y combinación en lo que hoy se conoce como las TIC, es el motor que impulsa el paradigma digital. Esta convergencia ha creado un sistema tecnológico que puede ser descrito cada vez más según su funcionalidad específica (velocidad de transmisión, capacidad de almacenamiento, potencia para procesar, resolución de la imagen, entre otras) y no de acuerdo con dispositivos que anteriormente estaban separados, como la radio, la televisión, la calculadora, el teléfono o la cámara.

Lo que hoy se conoce como el sistema tecnológico al que se denomina TIC, en realidad es la convergencia de cuatro antiguas trayectorias del paradigma digital, expresadas en el *bit* como representación de la información. Las *tecnologías utilizadas para capturar y difundir* información adaptan los contenidos en *bits*. Esta trayectoria evolutiva de la interoperación da continuidad a una arraigada tradición, que se remonta a cuando las paredes de una caverna sirvieron como la primera interfaz de las comunicaciones, y luego el papel, los monitores y los parlantes mejoraron el rendimiento. El desafío actual es el de erradicar por completo la fricción entre medios en los procesos humanos y artificiales, con la colocación de sensores en el centro de la inteligencia humana, es decir, el sistema nervioso y neuronal. El tipo de interfaz será la diferencia más característica entre las opciones tecnológicas que se conocen como TIC. Si bien las diferencias entre la radio, la televisión, el teléfono, el monitor de la computadora y el libro desaparecerán, las TIC actuales se distinguen debido al tipo de sensor y reproducción (voz, texto, imagen, interfaz cerebral, entre otros) y el grado de sensibilidad (resolución, decibeles y otros). Las *tecnologías utilizadas para transmitir e intercambiar información* representan el código binario para maximizar la velocidad de la comunicación. La teoría matemática de la comunicación binaria resulta tan eficaz, que todo tipo de redes de comunicación convergen hacia este protocolo, incluso la información en forma de voz, texto, imágenes o sensaciones que estimulan el

olfato. El límite de la comunicación no es geográfico como en los tiempos de Aristóteles, quien se hizo célebre al asegurar que cualquier influencia política o socioeconómica debía restringirse a un máximo de 70 kilómetros porque una persona no podía viajar más allá de esa distancia en un solo día. El límite de la comunicación está en la extensión de la red y en su ancho de banda. Las *tecnologías utilizadas para conmutar información* han mejorado notablemente en el último siglo, al duplicar su capacidad de conmutar de forma regular cada pocos meses. Suponemos que esta capacidad se duplica cada dos años, un supuesto que no haya sido comprobado empíricamente (vea Tuomi, 2002), pero representa una estimación gruesa en promedio. Si extrapolamos esta tendencia, se puede calcular que en 2023 una computadora que cueste 1.000 dólares realizará tantas operaciones por segundo como las conexiones neuronales que hace un cerebro humano. En 2049, una computadora que cueste 1.000 dólares ejecutará tantas operaciones por segundo en la misma fracción de tiempo que la humanidad entera realiza su conexión neuronal más básica (Kurzweil, 2001). En cuanto a la capacidad de fuerza bruta de procesar grandes cantidades de información, las opciones tecnológicas son mucho más potentes. La diferencia se nota en la calidad, con cada tipo de inteligencia dedicada a diferentes tareas, y la clave pasa a ser la complementariedad entre las diferentes partes del sistema. Las *tecnologías utilizadas para almacenar información* se convierten en los puntos de intercambio de la red y el hecho de que los datos digitales no compiten entre sí, representa un buen incentivo para conectar las unidades que antes estaban separadas.

3. LA INFORMACIÓN, EL CONOCIMIENTO Y LAS TIC*

La disciplina de la lógica, mediante la cual se intenta estudiar los procesos del pensamiento al razonar, ha recorrido un largo y sinuoso camino en los últimos milenios, pasando por los hitos que establecieron Aristóteles, Euclides, Boole, Russell y Whitehead, entre muchos otros. En décadas recientes se han logrado grandes avances en la conceptualización de los procesos cognitivos, especialmente debido a una mejor comprensión de cómo pueden ser simulados. “Muchos de los descubrimientos más importantes no se han producido por el estudio de los fenómenos que ocurren en la naturaleza, sino a raíz del estudio de los efectos que tienen dispositivos hechos por el hombre, como los productos de la tecnología... Nuestro conocimiento sobre la aerodinámica y la hidrodinámica existe principalmente porque fabricamos aviones y barcos, no debido a la presencia de los pájaros y los peces. Nuestro conocimiento sobre la electricidad no ha provenido principalmente del estudio de los rayos, sino del estudio de artefactos creados por el ser humano” (Pierce, 1980). En este sentido, nuestro entendimiento de lo que significa inteligencia y conocimiento ha mejorado enormemente con el estudio de dispositivos que imitan los procesos inteligentes.

Teniendo en cuenta que aún se intenta enriquecer este entendimiento, no debe sorprender que las definiciones relacionadas todavía están en proceso de formación. En esta sección se analizan la literatura y los conceptos básicos en el ámbito de las TIC, para difundir los consensos y los temas que están actualmente en discusión. El objetivo de presentar definiciones nunca debe ser el de defender convicciones personales sobre alguno de los aspectos, sino el de aplicar los términos en el mismo sentido en el que serían usados para que la comunicación sea más precisa. Con ese espíritu es que se repasarán algunos conceptos de la informática, incluyendo el significado mismo de la palabra información, cómo surge un significado, y cómo el conocimiento está relacionado. Siendo conscientes del riesgo de caer en un sesgo simplista y discriminatorio contra las concepciones alternativas, se debe recordar que la dinámica y el interés multidisciplinario en la teoría de la información hace que sea imposible presentar definiciones con las que todos estén de acuerdo.

Estas diferencias en las definiciones ya han trascendido el mundo académico—donde se hila más fino— y han sido incorporadas a las discusiones generales. En el nivel político más alto posible, una cumbre de jefes de Estado y de gobierno como fue la Cumbre Mundial sobre la Sociedad de la Información que celebraron las Naciones

* Este capítulo ha sido escrito por Martin Hilbert, de la Cepal.

Unidas entre 2003 y 2005, se debatió sobre los conceptos de sociedad de la información (UIT, 2006) y sociedad del conocimiento (Unesco, 2005). Mucha tinta ha sido utilizada y muchos seminarios y conferencias han terminado en polémicas sobre el significado de estos conceptos. Cada uno de ellos tiene su propio significado y depende del entendimiento actual de los términos conocimiento e información. En este capítulo se analizarán estos conceptos en relación con las TIC y se abordará el tema de las sociedades de la información y sociedades del conocimiento.

a. Datos, significado e información

Para comenzar, por datos se entiende cualquier tipo de símbolo, tenga significado o no. En términos generales, en la ciencia de las comunicaciones se distinguen tres niveles para darle significado a la palabra “datos”. Esta distinción se remonta al tiempo de Warren Weaver, quien tuvo el honor de escribir la introducción filosófica del libro en el que finalmente fue publicada la teoría matemática de Shannon (1948) (Shannon y Weaver, 1949).¹⁰ El primer nivel es la sintaxis, que tiene que ver con las normas que rigen la estructura de los símbolos, y que los lingüistas llaman gramática. La teoría de la información de Shannon se centra en este nivel, el nivel de los servicios de telecomunicaciones. En su trabajo fundacional de 1948 afirmó que todos los demás aspectos de la información son “irrelevantes al problema de ingeniería” de las comunicaciones. Allí se separa la comunicación de señales de otras perspectivas como la inteligencia artificial que también giran en torno al significado de “información”.¹¹ El segundo nivel se refiere a la semántica y conlleva la pregunta: “¿cuán precisa es la transmisión del significado de los símbolos?” (Shannon y Weaver, 1949). El tercer nivel es pragmático y se centra en la intención del mensaje y su efectividad. Por ejemplo, la frase “Pasaré por su casa mañana a las dos” tiene una estructura gramatical que sigue las normas del castellano y de su alfabeto. La semántica es importante para interpretar el significado de “a las dos”, que puede ser en la tarde o en la madrugada. También cobra importancia el contexto, que se define como la red que relaciona a diferentes datos. La parte pragmática de la información en esta frase sólo puede ser extraída si se conoce la red más amplia de relaciones entre ambas partes que se comunican. Si fuese entre amigos, sería una promesa; si fuese entre deudor y acreedor, sería una advertencia.

El hecho de que se necesitan enfoques complementarios para extraer información de los datos lleva a la interesante interrogante sobre si se puede afirmar que el significado es inherente al mensaje o está en otra parte. Esta pregunta es la clave de la distinción entre información y datos. Es natural pensar que la información está con la

¹⁰ Nótese que Shannon modestamente llamó este trabajo que realizó en 1948 “Una teoría matemática de la comunicación”, mientras que en 1949 se publicó un libro con un pequeño pero importante cambio en el título: “La teoría matemática de la comunicación”.

¹¹ Shannon fue muy activo en ambos campos.

parte que comunica, porque parece que los datos recibidos ya incluyeran esa información, pero en realidad, la información está tanto en la parte que comunica como en la parte que recibe esos datos.

Si uno lee la palabra “banco”, la decisión de pensar en una institución financiera o en la parte baja de un río depende en la ubicación de este símbolo en nuestra red de relaciones. La frase “el banco está inundado” puede tener diferentes significados para distintos lectores, es decir, la información que la semántica de la palabra “banco” no está dentro de la palabra misma, sino en cómo la vincula la parte receptora. Sólo se puede extraer el significado cuando se ubica la palabra en una red de relaciones de otros significados que representan al mundo que nos rodea. Si uno recibe señales en código Morse, éstas no revelan información si uno no posee el alfabeto que corresponde a ese código. La información que obtenga la parte receptora depende tanto de los símbolos que reciba como de las relaciones que defina el código Morse.

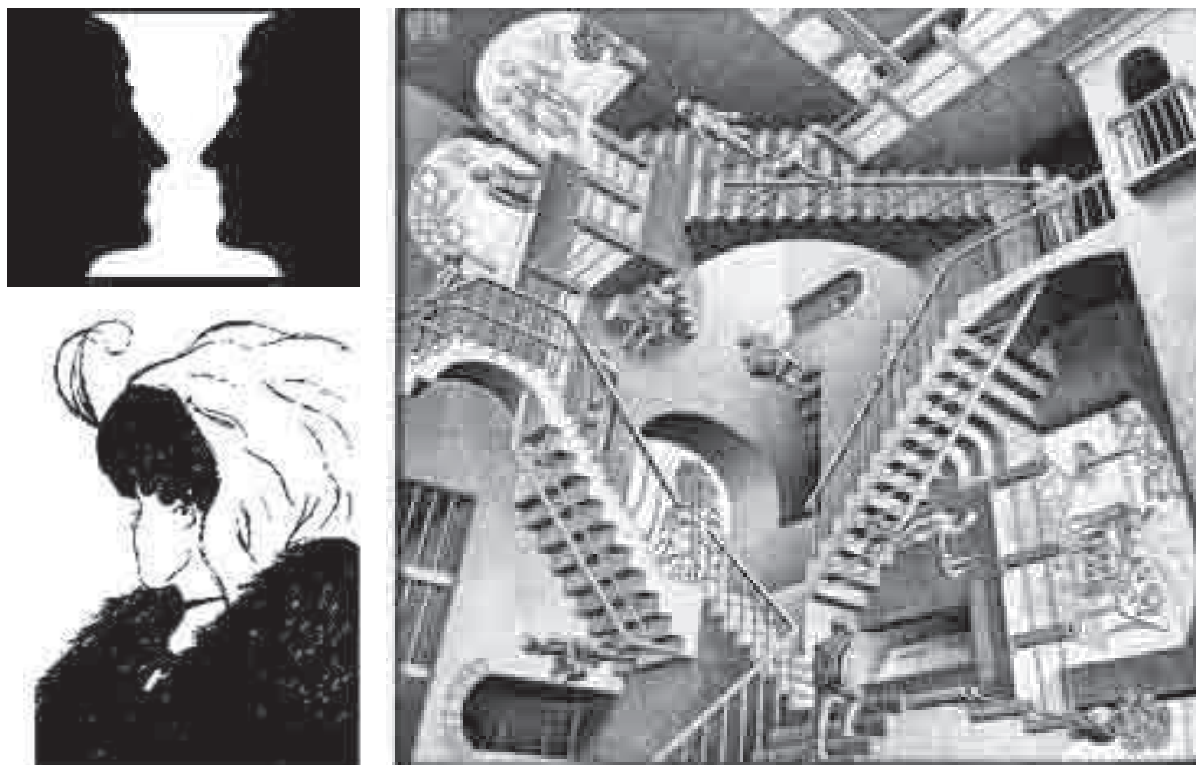
El símbolo “nmtes” tiene un significado claro si se definen “n” como “nueve”; “m” como “menos”; “t” como “tres”; “e” como “es”; y “s” como “seis”. De esa manera es una frase con sentido porque aceptamos que $(9 - 3 = 6)$ es verdadero en el mundo real. Los datos tendrían menos sentido si “n” fuese por “nueve”; “m” por “minutos”; “t” por “tarde”; “e” por “este”; y “s” por “sol”; y mucho menos sentido aún si fuese por “nada”; “mañana”; “trivialidades”; “estas”; “solas”. Aunque este último mensaje tiene mucho menos sentido, todavía existen relaciones muy lejanas cuando se colocan las palabras juntas. No podemos darnos cuenta de lo que significa, pero podría tener algún significado. En realidad, no hay manera de evitar que los símbolos cobren un significado una vez que son ensamblados en una red de relaciones, aun si habían sido creados sin esa intención. El hecho de que no hay una relación de significado también crea una relación.¹² En otras palabras, cuando se junta datos con datos, el resultado automático es “algún” tipo de relación y por tanto la comunicación es inevitable.

En la figura 3.1 se ven ejemplos de la diferencia entre datos e información. La parte superior izquierda contiene áreas en blanco y negro; estos datos permanecen igual, pero si observamos la información que contiene, se alterna constantemente entre dos caras en negro y un jarrón en blanco. Lo mismo ocurre con la parte inferior izquierda donde se presenta a una mujer joven que da vuelta la cara, pero al mismo tiempo el mentón de esta mujer joven podría ser la nariz de una mujer mayor, mientras que la oreja de la mujer joven podría ser el ojo de una mujer de más edad; en ambos hay información diferente con los mismos datos. El contenido de la información cambia cuando lo interpretamos de manera diferente, ya que lo encasillamos en otro marco que tenemos en nuestra mente: un marco que tiene que ver con un jarrón o un marco que tiene que ver con dos caras. El significado se deriva de la similitud entre cómo concebimos un jarrón y los datos que muestran un jarrón, con lo que se

¹² En este caso, el objeto no relacionado está ubicado en un lugar aparte de las relaciones de la red. Se convierte en parte del mapa aunque no está relacionado, y eventualmente podría surgir un objeto que haga de puente y sirva para encontrar una relación. De esta manera se crea nuevo conocimiento.

Figura 3.1

¿JARRÓN O CARAS? ¿ESPOSA O SUEGRA?
¿DÓNDE ES ARRIBA Y DÓNDE ES ABAJO?



Fuente: Rubin (1915), Hill (1915) y Escher (1953) en <http://images.google.com/>

destaca la importancia de tener un marco común de referencia. Si este marco común no existe, es imposible obtener de los datos la misma información.¹³

En este sentido, la comparación otorga significado; el término técnico es “isomorfismo”, que se define como la información que preserva las transformaciones. “La palabra ‘isomorfismo’ se aplica cuando dos estructuras complejas pueden acoplarse una sobre la otra de manera que para cada parte de una estructura haya una parte correspondiente en la otra estructura, y de manera que ‘correspondiente’ signifique que ambas partes tienen funciones similares en sus respectivas estructuras” (Hofstadter, 1979). Las comparaciones definen la manera en que los datos se relacionan con otros datos, que es lo que otorga significado. En otras palabras, el significado sólo puede existir si algo se relaciona con otra cosa, y es determinado de la manera como se relacionan. “El secreto de lo que algo significa para nosotros depende de cómo lo hemos vinculado a todas las demás cosas que conocemos” (Minsky, 1985). Cuanto

¹³ Esto demuestra la importancia insoslayable de las normas en el paradigma digital y la necesidad de que haya inteoperabilidad entre distintos sistemas de información.

más refleje el isomorfismo la red de relaciones del mundo real, es decir, el mundo como nosotros lo conocemos, más sentido y mayor significado tiene. “Una interpretación tendrá significado mientras que refleje de manera precisa algún isomorfismo del mundo real” (Hofstadter, 1979). Si un isomorfismo no está relacionado con el mundo que conocemos, nos confundiremos fácilmente. Esto es lo que se muestra en el gráfico de Escher en el lado derecho. Podemos observarlo durante horas y el significado de “arriba” o “abajo” cambia constantemente y es relativo según el contexto de las otras partes de la figura.

El significado en el mundo real puede cambiar a medida que cambia la red de relaciones en la que los datos están insertos. Por ejemplo, la esvástica había sido utilizada durante miles de años por casi todas las civilizaciones como símbolo de buena suerte y protección, y es uno de los símbolos más emblemáticos del budismo. Sin embargo, después que los nazis lo dieron vuelta y lo adoptaron como su emblema, para la mayoría de la gente ha sido imposible darle otro significado. Un cambio en el contexto y en el marco de referencia de la gente, cambió el significado del símbolo.¹⁴ Es más: “Nos resulta casi imposible separar los diferentes significados de las cosas de lo que han pasado a significar para nosotros” (Minsky, 1985). Esto es evidente con sólo tratar de mirar las letras de este texto sin convertirlas a información. Basta con imaginarse cómo nos hubieran parecido antes de aprender a leer. La influencia de la parte reveladora de información es tan importante como la fuerza de la parte que lleva esa información. Para expresarlo en las palabras de un antiguo concepto filosófico, la realidad –como nosotros la percibimos– es lo que es tanto como lo que nosotros entendemos de ella, y nos resulta imposible percibir “las cosas como realmente son” (*das Ding an sich*, según Immanuel Kant, 1781).

Esto puede resultar problemático cuando las computadoras intentan extraer información de los datos, como se explica en los polémicos libros de Hubert Dreyfus *What Computers Can't Do (Lo que las computadoras no pueden hacer, 1972)* y *What Computers Still Can't Do (Lo que las computadoras aún no pueden hacer, 1992)*. Todavía es demasiado complejo crear redes relacionales semánticas que sean comparables con las redes relacionales que utilizan los seres humanos cuando le asignan un significado a los datos. Por ejemplo, en la frase: “María estudia un algoritmo en un monitor y apoya su nariz en él”, incluso una persona tendría dificultades para decidir si se refiere al algoritmo o al monitor. La red semántica de un sistema computacional también podría carecer de la necesaria profundidad sobre las características de los monitores para poder comprender la última parte de la oración. El intento de ingresar en una máquina todas las características posibles o todos los objetos y situaciones

¹⁴ Una confusión similar existe sobre el signo de la paz, que en la antigüedad se utilizaba en algunas religiones ocultistas para simbolizar una crucifixión inversa. Por eso es que muchas veces es imposible comprender cabalmente el significado de textos e informaciones antiguos. Es inviable para un descifrador moderno no referirse al significado actual de los símbolos y palabras cuando analiza los textos antiguos. En este sentido, es improbable que se puedan esclarecer las palabras o símbolos de los textos de una civilización antigua.

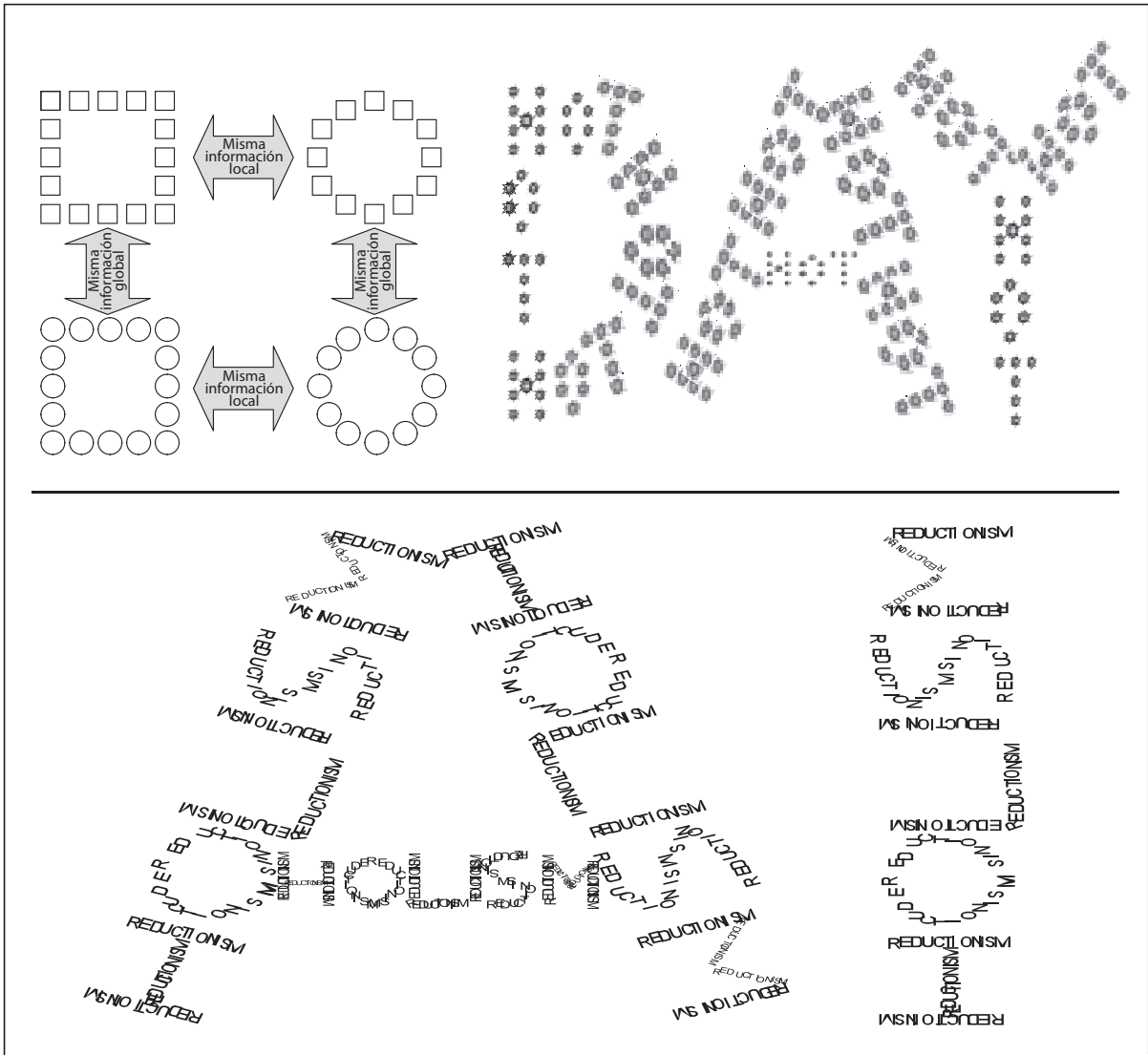
posibles con sus combinaciones resultó ser más difícil de lo que se pensaba para los científicos que trabajan con la inteligencia artificial.

Es interesante que la base del argumento de quienes sostienen que es factible crear inteligencia artificial se deriva de la misma línea de pensamiento. El hecho de que los mismos datos pueden conducir a información diferente sigue siendo verdad también a la inversa. Como el significado no se encuentra exclusivamente en el mensaje, es posible que la misma información sea producida en otros mensajes. Cuando alguien escucha la canción “Feliz cumpleaños”, la reconoce si está siendo tocada en una flauta o en una trompeta. Si la gente recuerda la canción, no se fija en qué clave la va a cantar y cuando varias personas la cantan juntas algunas la entonan un poco más grave o más aguda, algunas en F menor y otras en C. La relación entre los tonos es lo que hace la música y es decisiva para identificar la canción; en este caso la información es transmitida a nivel semántico mediante un isomorfismo de relaciones, independientemente de los símbolos con los que ha sido construido. La información relacionada a la identificación de la canción parece existir por sí misma y no depende de todos los detalles como flauta o trompeta, F menor o C. Por supuesto que la flauta podría transmitir un “Feliz cumpleaños” más suave que la trompeta. Para este nivel de significado, es decisivo el *hardware* que se utiliza. Parece haber diversos niveles de significado dentro del significado y algunos dependen más entre sí que otros.

A continuación se presenta el gráfico 3.1 con ejemplos. En la parte superior izquierda se ve una serie de cuadrados y círculos; el isomorfismo que se elija para relacionarlos de forma horizontal o vertical depende del nivel en el que la persona esté concentrada. La información es preservada principalmente de manera vertical en un nivel más global, mientras que es conservada también a nivel local en las relaciones horizontales de los símbolos. En el gráfico de la parte superior derecha se ve la palabra en inglés “DAY” compuesta de la palabra “HOT” escrita 12 veces. En el gráfico de la parte inferior se aplica una lógica similar, que ha sido presentada en una forma parecida por Hofstadter (1979) en su influyente libro *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid* (*Gödel, Escher, Bach: un eterno y grácil bucle*, 1979). El gráfico contiene tres tipos de información. Primero, se representa en letras grandes la sigla en inglés de inteligencia artificial, o AI. Segundo, está cuatro veces la palabra Holism (holismo) y esta palabra está formada por el término Reductionism (reduccionismo) escrito 56 veces. Nótese que la palabra “reductionism” no contiene ningún significado que se relacione con “AI”. El total es diferente a sus partes y posee un significado propio. Hubiera sido igual si se formaba la información de “AI” con un par de palos o gotas de agua en un plato. Dicho en terminología computacional, se podría afirmar que el significado de la información de la melodía de la canción es “independiente del *hardware*”, es decir, se pueden utilizar diferentes tipos de *hardware* para alcanzar el mismo significado.

Los diferentes niveles de los que está compuesta la información y las posibilidades de crearla por diversos medios han inspirado a los profesionales que trabajan en las ciencias de la computación y la inteligencia artificial para adentrarse aún más en la investigación. El resultado fue la interrogante sobre la posibilidad de aplicar la misma lógica a los procesos y a los procedimientos. Si se puede producir el mismo procedi-

Gráfico 3.1
¿CUADRADOS O CÍRCULOS? ¿HOT O DAY?
¿REDUCTIONISM, HOLISM O AI?



Fuente: basado en Hofstadter, D. (1979), *Gödel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid. A Metaphorical Fugue on Minds and Machines in the Spirit of Lewis Carroll*, Nueva York, Basic Books.

miento con el mismo *hardware*, debería ser posible reproducir la inteligencia en otros tipos de *hardware* diferentes al cerebro. No sería necesario reconstruir el cerebro neurona por neurona para simular algunos aspectos de los procesos que se realizan en este órgano. De esta manera, “se demostraría que la inteligencia es una propiedad que puede ser ‘trasladada’ desde el *hardware* en el que opera” (Hofstadter, 1979).

Con el gráfico anterior se demuestra que el significado puede surgir independientemente de la constitución de sus partes. Las letras “AI” quedarían formadas aunque las palabras “holism” y “reductionism” fueran reemplazadas por las palabras “AI es imposible”. Las partes pueden carecer de sentido o incluso podrían contradecir al significado general, pero el significado general tiene existencia propia. De la misma manera que el significado puede surgir a un nivel superior de partes que carecen de él, la inteligencia podría surgir a un nivel superior de partes que no son inteligentes. Si se pueden descifrar los procedimientos que son utilizados por el cerebro, como se ha intentado hacer durante siglos en los campos de la psicología y la neurología, estos procedimientos de mayor nivel podrían ser imitados en otros tipos de *hardware*. Este *hardware* podría consistir de transistores, cristales, moléculas, fotones o efectos cuánticos, como se expondrá más adelante en un capítulo sobre el actual estado del arte de las tecnologías. El primer paso es determinar lo que significa “procedimiento inteligente”.

b. De la información al conocimiento

En diversas disciplinas se distingue entre el conocimiento de los procedimientos y el conocimiento descriptivo. El conocimiento descriptivo (también llamado declarativo propositivo) es información que se expresa en oraciones declarativas o proposiciones indicativas. El conocimiento de los procedimientos es el que se ejerce en el desempeño de alguna tarea, también denominado el *know-how*. Si una persona sabe cuántos habitantes tiene su ciudad, no es porque los ha contado a todos (conocimiento descriptivo). Si alguien piensa sobre el número de sillas que hay en una habitación, no obtiene la respuesta de un almanaque mental, sino que se dirige al lugar, física o mentalmente y las cuenta (conocimiento de los procedimientos); tiene el *know-how* para hacerlo. Ambos tipos de conocimiento pueden ser implementados en las soluciones de inteligencia artificial, donde el conocimiento de los procedimientos es generalmente una consecuencia global de cómo funciona el programa, y no un tipo de memoria local. La manera en la que Babbage diseñó los procedimientos de su motor en 1822, representaba el conocimiento de los procedimientos. El conocimiento descriptivo fue la base de las tarjetas que se ingresaban a la máquina de tabulación utilizada en el censo de 1890 en Estados Unidos.

Lo anterior demuestra que los procedimientos nacen cuando se activa la información. Si las acciones no son totalmente aleatorias, la secuencia que se obtiene es guiada paso por paso según una cierta estructura. Este conjunto de instrucciones se denomina algoritmo, es decir, un procedimiento efectivo. “Un algoritmo es sencillamente la receta para procesar, como una receta para cocinar, pero escrito sin ambigüedad alguna. Es una lista de instrucciones en la que cada instrucción estipula exactamente cuál debe ser el próximo paso” (Baum, 2004). Esta secuencia de instrucciones también contiene información e información sobre la secuencia y relación de informaciones, la llamada metainformación. Toda información puede tener un significado mayor o menor. Como en el ejemplo presentado anteriormente con el símbolo “nmtes”, el nivel de significado depende de la relación que la secuencia tenga con la realidad.

En la epistemología, la rama de la ciencia dedicada a la teoría del conocimiento, se identifican dos métodos para comprender lo que pasa en nuestro entorno: el empirismo y el racionalismo. En el primero se hace hincapié en la experiencia, y en el segundo se hace énfasis en que estos procesos ya han tenido prioridad y que pueden ser parte de una estructura de la mente humana de la que no tenemos conciencia. El empirismo fue aplicado por Johannes Kepler cuando estudió los datos astronómicos de Tycho Brahe para elaborar sus teorías. Por otro lado, si bien Albert Einstein se inspiró en gran parte en las obras de Maxwell y Lorentz para elaborar su teoría de la relatividad, seguramente nunca había sentido a nivel personal que el tiempo y el espacio son lo mismo, pero empleó la imaginación y la intuición para pensar sobre la relatividad.

Un ejemplo de cómo se puede llegar a esas conclusiones mediante un enfoque empírico es el conocido proceso de ajuste de curvas, que se aplica en todo tipo de ciencias, desde la economía y la sociología, pasando por la física y la química hasta la medicina y la psicología. El ajuste de curvas consiste en encontrar una curva que pueda unir una serie de puntos basados en datos. Cada punto que la línea tiene que unir representa una restricción, y si la línea une muchos puntos, es poco probable que sea por casualidad, porque hay muy pocas maneras de dibujar la línea. “Si uno posee una colección de puntos basados en datos que han sido bien recopilados y se puede dibujar una línea recta que los una, se puede estar bastante seguro de que ha descubierto alguna verdad sobre el mundo” (Baum, 2004). El hecho de que es posible ajustar una curva a los datos significa que el proceso mediante el cual se produjeron esos datos funciona de acuerdo con un procedimiento específico. En realidad, la curva refleja este procedimiento paso por paso y preserva su estructura; en otras palabras, la curva es un isomorfismo del proceso del mundo real que creó esos datos.

Si los datos son completamente aleatorios, la función que se derive de ellos consistirá exactamente de la misma cantidad de datos que puntos basados en datos. La definición de la palabra “aleatorio” hace imposible que sea más compacto, porque la incertidumbre sobre la ubicación del próximo punto es demasiado alta (no es posible reducir la “complejidad”). Si la función que describe a esta curva se puede expresar de una forma más simple que los puntos, entonces se hace más significativa, porque disminuye la incertidumbre sobre la ubicación del próximo punto. Lo contrario de incertidumbre es información, y el proceso por medio del cual se produce información se denomina conocimiento, es decir, la función que se deriva de ese proceso capta el conocimiento sobre el proceso que produce los datos. Esto es posible si se identifica una estructura que organice los datos, y si la fuente de los datos los produce de acuerdo con un cierto procedimiento. En otras palabras, una descripción compacta de los datos es posible siempre que se pueda identificar una estructura. Una vez que se encuentra una descripción compacta de una gran cantidad de datos, esa descripción corresponde al proceso que produce los datos y por tanto a fenómenos del mundo.

Cuanto más compacta sea la función en comparación con el conjunto de todos los datos, mayor significado captará y por lo tanto mayor será su componente de conocimiento. Los datos se comprimen en una pequeña representación (información sobre cómo producir esta información) que capta un significado real sobre el mundo. “La

semántica es el resultado de la compresión” (Baum, 2004). Esta idea es similar a la creencia popular de que si dos explicaciones aclaran exactamente lo mismo y una de ellas es más simple, la explicación más corta es la mejor (el denominado criterio o navaja de Occam). La explicación más simple representa una mejor comprensión del fenómeno y su componente de conocimiento es mayor. Una vez que se ha identificado una descripción simple, es posible completar la información que falta y hacer predicciones. Esto es posible con una precisión infinita si la curva se ajusta lo suficientemente bien, como en las leyes de la física. Si la curva no se ajusta lo suficientemente bien, la previsibilidad es menor, como en las predicciones sobre la economía o el futuro del desarrollo tecnológico. La previsibilidad es un concepto fundamental al definir inteligencia y conocimiento, porque previsibilidad es la definición misma de realidad. Uno define como normal algo que es previsible; si no lo es, entonces debe tratarse de un fenómeno “paranormal”, pero no algo real como esperamos que sea.

Si bien el ejemplo del ajuste de curvas es ilustrativo sobre el proceso de creación de conocimiento, no se pretende presentar una visión más favorable del enfoque empírico o del enfoque racional. El resultado de ambos es igual: una descripción compacta que corresponde cabalmente a un suceso del mundo real. En enfoque *empírico* es interesante, dado que en la actualidad las computadoras son cada vez más efectivas en la creación de conocimiento, mediante el análisis de una gran cantidad de datos empíricos. La capacidad de procesamiento de la computadora le permite identificar patrones donde el cerebro humano nunca captaría algún tipo de lógica, lo que le permite establecer conexiones en casos en los que no se han visto relaciones anteriormente. Ejemplos de este tipo de soluciones de inteligencia artificial son Google y otros buscadores de internet. Google es el mejor ejemplo de un algoritmo compacto y dinámico que permite convertir datos en información. Es una manera dinámica de aprender, ya que el contexto cambia y debe adaptarse al nuevo entorno. De esta manera el conocimiento hace disminuir la necesidad de búsqueda y por tanto permite acelerar los procesos y hacer predicciones.

Esto es posible debido al descubrimiento de atajos que nos ayudan a aprovechar la estructura de nuestro entorno. A medida que pasa el tiempo vamos encontrando formas más simples, “trucos”, que son programas compactos que pueden ser utilizados para pasar a tareas más complejas. Por ejemplo, se sabe inmediatamente que el número 98532 es divisible por 2 porque es un número par. ¿Se puede saber si también es divisible por 3 sin hacer el cálculo completo? Los estudiantes ya aprenden el truco en la secundaria para aprovechar este tipo de estructura: como $9+8+5+3+2 = 27$ y 27 es divisible por 3. La estructura del número más grande revela que es divisible por 3, sin necesidad de hacer la división entera. Tomando estos dos resultados, se puede saber que el número también es divisible por 6, porque 6 es divisible por 2 y por 3. Es el resultado de los dos procesos anteriores. En otras palabras, para saber si el número 98532 es divisible por 6, se debe calcular si es divisible por 2 y por 3.

La idea detrás de este tipo de atajos está en línea con el truco que enseñó Newton para obtener la raíz cuadrada, como se explicó en el capítulo anterior. Los científicos de la informática denominan a estos trucos como “subrutinas”, que son las piezas que conforman los algoritmos más complejos y modulares. Un programa largo normal-

mente es como una sociedad compleja, compuesta de múltiples módulos que se relacionan unos con otros, y cada módulo tiene una tarea específica dentro de una división del trabajo. Funciones bastante complejas y sofisticadas pueden ejecutarse sobre la base de operaciones muy simples. Cada función está compuesta de funciones más pequeñas que permiten concentrarse en tareas de mayor nivel inmediatamente, sin distraerse con los detalles de las tareas menores. Si se observa con mayor detenimiento el gráfico de la parte superior derecha donde la palabra “DAY” se escribe con 12 pequeñas palabras “HOT”, se ve que las 12 palabras “HOT” están escritas con 252 pequeños soles. La lógica de un programa modular debería aplicar estos tipos de significado a diferentes niveles para constituir el concepto general de “día caluroso y soleado” (*sunny hot day*). Un nivel lleva a otro, cada nivel aporta nueva información y cuando se extrae información de todos ellos desde diferentes perspectivas, se pueden construir mensajes coherentes. Un procedimiento efectivo, un algoritmo, define cómo producir y cómo combinar diferentes mensajes.

En el nivel más bajo puede haber simples compuertas *booleanas* que dejen pasar la corriente o no.¹⁵ La sociedad de subprocedimientos tiene por objetivo realizar procesos más complejos de mayor nivel (Minsky, 1985), y se usan distintos lenguajes en los diferentes niveles de esta sociedad. El nivel más bajo, que conecta los cables y las compuertas entre sí es controlado por el llamado “lenguaje máquina”. Este idioma es muy detallado y describe procedimientos como “si 1 y 0 entran, convertirlos en 0” (compuerta de NAND), mientras que grupos de procedimientos de este tipo pueden ser resumidos en un código de ensamblaje de mayor nivel. El propósito del código de ensamblaje es separar por grupos las instrucciones en “lenguaje máquina” para que en lugar de escribir la secuencia de *bits* como “010111000” el programador pueda escribir instrucciones como “sumar” para ejecutar la operación. Cada término de esta naturaleza puede representar cientos de instrucciones, que no son demasiadas, ya que se necesita ese número de órdenes para mover un solo símbolo en la pantalla de la computadora. Por tanto, todavía se requiere mucho trabajo para lograr algo interesante. A principios de los años cincuenta se descubrió que estos grupos de instrucciones tienen una serie de estructuras características que reaparecen en programa tras programa. Para ejecutar procesos complejos, estas funciones se aglutinaron en grupos aún más grandes, y los programas constituidos sobre la base de esta idea se llamaron lenguajes compiladores o lenguajes de alto nivel. Mediante estos lenguajes se pueden escribir procedimientos complejos, algoritmos que consisten de múltiples

¹⁵ Nótese que, por supuesto, las compuertas *booleanas* no son “el nivel más bajo” de esa lógica repetitiva, porque están formadas por algo físico. El tema del “nivel más bajo” ha dado origen a un gran debate filosófico; muchos afirman que el nivel más bajo consiste de leyes de la física que guían al Universo y que todo lo demás, incluso objetos físicos como los cerebros, está sujeto a ellas. No obstante, la ciencia de la física no posee leyes definitivas y unificadoras. La famosa “fórmula mundial” aún no ha sido descubierta, aunque en algunos sectores se asegura que el nivel más elaborado de la física, el nivel cuántico, se define por la información misma y todo lo demás se construye desde allí (Zeilinger, 1999). Esta hipótesis llevó al reconocido físico John Archibald Wheeler a formular la pregunta que aún no tiene respuesta: *It from bit?* (¿Es la información el origen de todo?)

componentes, y subrutinas como, por ejemplo, en los famosos programas “Fortran” y “Algol” (*algorithmic language* o lenguaje algorítmico). Un científico de la informática no necesita saber qué pasa cuando ejecuta la función SQRT (x), mientras sepa que el efecto será que se extraerá la raíz cuadrada (*véase* el algoritmo presentado en el capítulo anterior). Nótese que el nombre “lenguaje de alto nivel” es relativo al progreso técnico. Hay lenguajes como COBOL y C que han sido considerados de alto nivel, pero muchos programadores se podrían referir hoy a C como de bajo nivel, en comparación a lenguajes como Prolog o Yacc (que significa *Yet Another Compiler-Compiler* o “simplemente otro compilador”).

Además de permitirle al programador que se concentre en procesos mayores en lugar de quedar atrapado en funciones relativamente pequeñas, el esquema de subrutinas tiene otras ventajas. La estructura descentralizada previene que ocurra una falla de todo el sistema a causa del mal funcionamiento de una subrutina específica. Además, la misma subrutina puede ser utilizada de forma reiterativa. La inteligencia humana, que también es de naturaleza modular, frecuentemente funciona de esta manera, ya que mediante metáforas usamos los mismos procedimientos para relacionarnos con cosas totalmente diferentes (Feldman, 2006). Con esta afirmación queda “claro” que el significado “surge” de nuestro lenguaje al “conformar un mosaico” de conceptos “multicolores”. Las metáforas son isomórficas, ya que son operaciones que preservan información, aunque su uso nos deja “el campo abierto” para la creatividad, en el sentido de que pueden ofrecer nuevos significados.

En síntesis, aquí las definiciones que se han elaborado: los datos adquieren significado de su contexto, que es la relación que tienen con otra información, y las estructuras que se derivan de relaciones son significativas cuando reflejan fenómenos del mundo que conocemos y aceptamos. En otras palabras, el significado es el aprovechamiento de la estructura compacta del mundo; el aprovechamiento de esta estructura mediante la comprensión permite formular procedimientos con los que se puede explicar y hacer predicciones sobre el mundo. Eso es el conocimiento. El conocimiento se crea mediante la formulación de un algoritmo con el que se puede predecir la conducta de una fuente de información. Cuanto más simple sea y cuanto más explique el algoritmo, mayor será su componente de conocimiento.

c. Diferentes tipos de conocimiento y el traslado de la inteligencia

En las ciencias socioeconómicas a menudo se aborda la distinción que hizo Michael Polanyi (1966) entre conocimiento tácito y conocimiento explícito o codificado. Según este planteamiento, el conocimiento tácito es el que las personas llevan en su mente y, por tanto, es difícil acceder a él. El aforismo irónico de Polanyi insinúa que “sabemos más de lo que podemos transmitir”. La transferencia efectiva del conocimiento tácito generalmente requiere una interacción personal intensa para que las destrezas correspondientes aparezcan de alguna manera en la parte receptora. El proceso de transformar el conocimiento tácito en conocimiento explícito se conoce como codificación o articulación. Una vez que el conocimiento es codificado, se lo puede almacenar en algún medio para luego transmitirlo.

Un ejemplo de conocimiento tácito sería la destreza y hábitos profesionales de un artesano, quien tal vez quisiera codificar parte de su conocimiento en un manual que explique los procedimientos y ofrezca instrucciones. Una condición para la codificación es que el articulador sea consciente de lo que está haciendo y de cómo se hace paso por paso. Esto no es lo que sucede muchas veces porque el conocimiento ha sido adquirido mediante el proceso de prueba y error. Sería muy difícil para un cocinero italiano codificar todos los procedimientos y eventualidades necesarios para asegurarse que la pasta quede siempre bien cocinada. El cocinero no puede transmitir lo que está haciendo, porque no “sabe explícitamente” lo que está haciendo, sin poder articularlo; simplemente lo hace, cada vez un poco diferente, de acuerdo con una vasta gama de posibilidades para prever cualquier eventualidad y conseguir que la pasta quede siempre a punto. Una vez que se comprende en detalle la estructura del proceso, el conocimiento correspondiente se puede codificar en un algoritmo, de la misma manera que la metáfora del manual del artesano. Lo mismo ocurre con otras destrezas como practicar karate, jugar al ping-pong o pilotar un helicóptero.¹⁶ Es por eso que las soluciones de inteligencia artificial para este tipo de funciones se aplican mejor mediante el aprendizaje de máquina que mediante normas predefinidas. De esa manera la máquina puede descifrar cómo debe desempeñar la tarea que se le ha encargado sin que una persona tenga que dictarle cada paso, de la misma manera que se arroja a un perro al agua para que nade. El perro no sabe cómo lo hace y hay diferentes maneras de evitar ahogarse. En este sentido, la destreza aprendida es tácita. En el capítulo sobre inteligencia artificial se retomará el tema del aprendizaje de máquina, que es básicamente un proceso de prueba y error que es ejecutado por un programa que aprende con el almacenamiento de los resultados obtenidos.

Como se ha mencionado, John Von Neumann planteó que los avances en el campo de la inteligencia artificial dependen de nuestra comprensión de los procesos inteligentes, algo que las computadoras aún no pueden hacer. Una vez que se comprende totalmente el *modus operandi* de estos procesos, entonces pueden ser recreados en dispositivos artificiales. Esto lleva a la consecuencia paradójica de que una computadora no puede hacer muchas cosas que los seres humanos consideramos tareas básicas, como hablar o armar un rompecabezas; sin embargo, estas tareas no son tan básicas como parece (Minsky, 1985). Un bebé debe atravesar un difícil proceso de aprendizaje para poder armar un rompecabezas; más adelante en la vida, las personas ya tienen automatizado el proceso de reconocer las partes de ese juego (incluyendo los colores, tamaño y lugar, a pesar de que tengan fondos diferentes, estén en la sombra o en la luz o semiocultos), determinar cuál parte es la que falta, mover la mano para agarrar las partes (sin destruir lo que ya ha sido construido), y al mismo tiempo

¹⁶ Los cineastas Larry y Andy Wachowski hicieron una conocida alusión a estos conceptos en su “Trilogía de Matrix” entre 1999 y 2003, al insinuar que dentro de Matrix las capacidades, es decir, el conocimiento tácito como practicar karate o manejar una motocicleta, pueden ser descargadas e instaladas en una persona específica (Warnerbros, 2003). En realidad, estas habilidades son tácitas para la inteligencia humana y requieren una práctica y entrenamiento intensos.

mantener un registro de lo que se está haciendo. Este proceso “de sentido común” es en realidad una tarea compleja y es el resultado de un aprendizaje detallado. Es mucho más difícil que la función de sumar o multiplicar dos números o de extraer la raíz cuadrada de acuerdo con el método de Newton. En estos problemas hay menos información que en las innumerables posibilidades que deben ser consideradas cuando se resuelve un rompecabezas simple. “Lo que la gente llama vagamente sentido común en realidad es más complejo que la mayoría de las capacidades técnicas que son objeto de admiración” (Minsky, 1985). Dado que tenemos una mejor comprensión de tareas consecutivas e iterativas, como calcular, no sorprende que ha sido mucho más fácil construir máquinas que puedan imitar e incluso optimizar estas tareas.

La consecuencia de nuestra mejor comprensión de cada vez más procesos es el movimiento constante de la línea que separa al conocimiento tácito del codificado. En este sentido, según el teorema de Hofstadter (1979), cualquier actividad intelectual que pueda ser ejecutada por una máquina requiere menos inteligencia humana y eventualmente pierde importancia para ella. La inteligencia humana es extremadamente flexible y empieza a dedicarse a nuevas tareas. Por ejemplo, hace cientos de años era una habilidad tácita de un campesino el saber la hora exacta, y cuánto tiempo faltaba para el atardecer. Desde el momento en que la humanidad fue capaz de construir máquinas que se ocuparon de esta tarea de una manera mucho más precisa la mente humana se dedicó a construir sobre esta base tecnológica común, y creó, por ejemplo, innovaciones como la gestión en tiempo real, por medio de la cual, diversos procesos son sincronizados segundo a segundo (*just in time*). Claro que, si bien hace cientos de años nuestro campesino hubiera impresionado con la habilidad para determinar un segundo exacto en cada instante del día (¡qué inteligente!), hoy nadie afirmaría que un reloj es algo inteligente. En las palabras de otro de los fundadores del campo de la inteligencia artificial, Marvin Minsky (1985): “Nuestras mentes contienen procesos que nos habilitan para resolver problemas que consideramos difíciles. ‘Inteligencia’ es el nombre que le damos a cualquiera de esos procesos que todavía no comprendemos... el concepto mismo de inteligencia es como el truco de un mago; como el concepto ‘las regiones inexploradas de África’, que desaparece en cuanto lo descubrimos”.

En décadas recientes, muchos procesos que habían sido clasificados como productos únicos de la inigualable inteligencia humana, han sido colocados del otro lado, incluyendo a los cálculos, el álgebra y la mayor parte de la matemática; el reconocimiento facial en los puestos fronterizos; la capacidad de jugar ajedrez; pilotar aviones; conocer el camino en una ciudad y evitar el congestionamiento vehicular; optimizar un plan complejo de logística; la investigación para tareas operacionales y de planificación; la identificación de vinos por su lugar de origen, y el pronóstico del tiempo, entre muchos otros. Hay procesos que se encuentran en la frontera entre ambos campos, y si bien las máquinas ya rinden más que el humano medio, aún existe un grupo de especialistas que sigue estando más avanzado que los dispositivos digitales. En este último grupo están quienes diagnostican enfermedades, escogen acciones en la bolsa de valores, traducen varios idiomas, componen e improvisan música, juegan ping-pong, y muchos más, aunque la frontera siempre se está moviendo. Antiguamente la acción

de extraer la raíz cuadrada era considerada como conocimiento tácito y requería una larga y difícil capacitación. El criterio que aplica la generación de un abuelo para evaluar el alcance de la inteligencia artificial seguramente será muy diferente del criterio que aplicará el nieto. Después que las primeras expectativas de los años ochenta sobre las posibilidades ilimitadas de la inteligencia artificial han sido reemplazadas por la realidad (el llamado invierno de la inteligencia artificial), ha surgido una industria de miles de millones de dólares que suministra las herramientas digitales más diversas, que están al alcance del consumidor común.

d. Cerebros y computadoras

Esta sección es una excursión a uno de los debates más antiguos e intensos. Dado que ya se ha definido los conceptos más importantes, como datos, información, significado, conocimiento e inteligencia, su omisión no distorsionará la lectura. En esta sección se verá que estos conceptos representan tanto a la inteligencia biológica como a la artificial. Desde que Alan Turing formuló su histórico planteamiento de que las máquinas podrían imitar el cerebro humano, la computadora digital y el cerebro han sido considerados gemelos.

El cerebro está compuesto de neuronas interconectadas que manipulan información mediante señales electroquímicas, y las sinapsis pueden servir para estimular o inhibir. Una computadora contiene compuertas conectadas que manipulan información mediante señales electrónicas, y las respectivas compuertas lógicas pueden hacer pasar la corriente o inhibirla (1 a 0). La analogía era obvia, aunque uno de los dos gemelos es un par de millones, o tal vez miles de millones más antiguo que el otro. Entonces, el gemelo más joven tuvo que alcanzar al más antiguo y, debido a los éxitos obtenidos al comienzo, las expectativas eran muy altas. El cuadro que se incluye más abajo demuestra que las computadoras digitales están alcanzando a pasos agigantados las habilidades computacionales básicas del cerebro. Mientras que la computadora digital ha alcanzado estos índices en pocas décadas y sigue mejorando de forma exponencial, el cerebro no ha cambiado significativamente en los últimos 10.000 años. De todas maneras, la comparación parecía un insulto a la humanidad y la pregunta sobre si nuestro órgano más valioso era una mera computadora que procesa información cayó en un intenso debate ideológico, en lugar de ser objeto de una discusión científica.¹⁷ Hoy parece ser que la respuesta depende del significado que le damos a la palabra “computadora”.

¹⁷ Searle (1984) resume la discusión de la siguiente manera: “Como no entendemos muy bien el funcionamiento del cerebro, siempre estamos tentados a usar la última tecnología como modelo para tratar de comprenderlo. Cuando yo era niño siempre nos aseguraban que el cerebro era como una central telefónica (¿Qué otra cosa podría ser?). Me parecía simpático que Sherrington, el gran neurocientífico británico, pensaba que el cerebro funcionaba como un sistema de telégrafo. Freud muchas veces comparaba al cerebro a los sistemas hidráulicos y electromagnéticos. Leibniz lo comparaba a un molino, y me he enterado que en la antigua Grecia se creía que el cerebro funcionaba como una catapulta. En la actualidad, obviamente, la metáfora es la computadora digital”.

Cuadro 3.1

**COMPARACIÓN DE LA CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO
EN COMPUTADORAS DIGITALES Y EL CEREBRO HUMANO**

	Computadora digital (circa 2003)	Cerebro humano
Unidades computacionales	1 procesador central, 10^8 compuertas	10^{11} neuronas
Unidades de almacenamiento	10^{11} bits por disco	10^{11} neuronas
	10^{10} bits de memoria RAM	10^{14} sinapsis
Ciclo	10^{-9} segundos	10^{-3} segundos
Ancho de banda	10^{10} bits / segundo	10^{14} bits / segundo
Ampliación de memoria	10^9 por segundo	10^{14} por segundo

En la última década, los importantes avances en dos de los principales campos de la ciencia dedicados a la inteligencia y el conocimiento –la computación y la neurología– han dejado muy claro que las computadoras digitales tradicionales y el cerebro son decisivamente diferentes. Las dos diferencias básicas están en su estructura: la forma en que están contruidos y funcionan, y la manera en que incorporan su funcionalidad. La mayor parte de la gente describe una computadora como un aparato que procesa información siguiendo el diseño de Von Neumann. Contiene una unidad procesadora, que consulta una lista de instrucciones que ha sido previamente instalada en una memoria aparte, y cuenta con un lugar de almacenamiento para cualquier tipo de información producida u obtenida. La tesis Church-Turing ha demostrado que esa estructura puede resolver cualquier tipo de problema computable, y los ingenieros se han inspirado desde el tiempo en que Turing describió el funcionamiento de su máquina universal para utilizarla en los más diversos problemas de procesamiento informático. Por otro lado, el cerebro es entrenado en lugar de programado, y no almacena información en una unidad de memoria separada y centralizada, sino que a través de su red completa (*véase*, por ejemplo, Al-Chalabi, Turner y Delamont, 2006).

Después de este descubrimiento, empezó la carrera para crear diferentes tipos de computadoras y se comenzó a experimentar con redes neuronales artificiales y computación paralela. Las denominadas redes neuronales son distintas a una computadora tradicional, en el sentido de que no poseen un procesador central y no almacenan la información en una memoria centralizada. El conocimiento y las memorias de la red están distribuidos a lo largo de sus conexiones, igual que en un cerebro. No obstante, reemplazar los transistores con neuronas artificiales no es lo mismo que saber cómo conectarlos (Hawkins y Blakeslee, 2004). Imaginemos que alguien que nunca ha visto una computadora trata de aprender cómo funciona. Después de abrirla y desarmarla, se da cuenta que está compuesta de transistores; desde este paso hasta las

simulaciones computacionales modernas hay un largo trecho e innumerables caminos que se podrían tomar. Los transistores se pueden utilizar en aplicaciones tan diversas como los amplificadores de la televisión y radio análogas o el programa WordPerfect, y a través de la computación neural se ha descubierto que ocurre lo mismo con las neuronas. Otra promesa de alcanzar la potencia del cerebro mediante instrumentos artificiales era la computación paralela, que representa una diferencia notable con respecto al procesamiento secuencial de las computadoras tradicionales. Sin embargo, en este esquema también surgió el mismo problema; existen innumerables maneras de implementar procesos de información paralela y la ciencia aún está lejos de comprender cómo está diseñada la arquitectura paralela del cerebro.

La siempre recordada “regla de los cien pasos” ejemplifica la diferencia en arquitectura. “Hay muchas tareas, como dar el nombre de un cuadro o decidir si una palabra es un sustantivo, que un ser humano puede ejecutar en alrededor de medio segundo. Esto significa que el cerebro, un dispositivo compuesto de elementos neuronales puede, con una velocidad computacional básica de pocos milisegundos, resolver problemas visuales o lingüísticos complejos en un par de centenares de milisegundos, es decir, en alrededor de cien pasos. Los mejores programas de inteligencia artificial para resolver estos problemas no son tan generales y requieren de millones de pasos computacionales. Esta regla de los cien pasos es un obstáculo importante en cualquier modelo de conducta computacional” (Feldman y otros, 1988). En otras palabras, sabemos que la estructura física del cerebro no le permite ejecutar más de cien pasos en medio segundo, pero no tenemos idea de cómo logra tanto con tan pocas operaciones. Las computadoras tradicionales deben ejecutar millones de rutinas y subrutinas, navegar a través de enormes memorias y son asombrosamente rápidas. Desde hace mucho tiempo han conseguido resultados similares o incluso mejores que un ser humano, como se demostró con el partido de ajedrez que Kasparov disputó con la computadora llamada *Deep Blue* (IBM, 1997). Sin embargo, esto no cambia el hecho de que el cerebro y la computadora funcionan de formas intrínsecamente diferentes.

Parece ser que el cerebro no computa las respuestas para los problemas, sino que las sustrae de diferentes niveles jerárquicos de memoria (Hawkins y Blakeslee, 2004). Estos diferentes niveles jerárquicos contienen isomorfismos específicos que conducen a diversos significados para conceptos similares o diferentes. Cuando una persona ve una taza, no ve un conjunto de átomos, pero reconoce si se trata de una taza que nunca ha visto, aunque sea tan pequeña como una de café expreso o tan grande como una de café con leche, independientemente de si está trizada, está hecha de vidrio o es de muchos colores. Esto demuestra que el cerebro utiliza diferentes niveles de abstracción para clasificar conceptos importantes de acuerdo con una cierta jerarquía. “No se encontrará almacenada en el cerebro la figura de una taza o cualquier otro objeto. Al contrario de lo que ocurre con una cámara, el cerebro recuerda el mundo como es, no como parece. Cuando una persona piensa sobre el mundo, recuerda secuencias de patrones que corresponden a la forma que tienen esos objetos en el mundo y cómo se mueven, no cómo aparecen a través de un sentido particular en algún momento” (Hawkins y Blakeslee, 2004). Este es el punto en el que la mayoría de las computadoras actuales se estancan. Para una máquina es muy difícil distinguir si en

los gráficos anteriores hay cuadrados o círculos, o si dice “reductionism”, “holism” o “AI”; al mismo tiempo, la inteligencia biológica puede descifrar isomorfismos de todo tipo. La organización jerárquica de conceptos para distinguir entre diferentes niveles de significado es una habilidad de la inteligencia humana que todavía no se comprende totalmente y “sigue siendo uno de los mayores misterios de todas las ciencias” (Hawkins y Blakeslee, 2004).

En realidad, al cerebro ni siquiera le importan mucho los estímulos que recibe de los cinco sentidos del organismo. Como se explicó anteriormente, la información no está necesariamente incluida en los datos, y el cerebro combina memorias con información recibida de estímulos sensoriales para darles sentido. Por ejemplo, cuando uno lee una frase conocida, tal vez no reconocería que está escrita de manera diferente a la esberada. Una máquina tradicional se detendría al llegar a las palabras “recomocería” y “esberada”, mientras que una persona quizás no se daría cuenta del problema. La combinación de predicciones a partir de la memoria y de estímulos sensoriales nos hace ver cosas que no están.¹⁸ Esto complica la vida a los psicólogos y a sus pacientes que alucinan, pero en un nivel más sutil es clave para la supervivencia porque acelera el procesamiento de información. A veces saltamos si vemos lo que nos parece una serpiente en el suelo, pero si miramos nuevamente resulta ser un pedazo de sogá. Cuanta más memoria pueda almacenar el cerebro y cuantos más significados diferentes le pueda atribuir a diversos datos, mayores serán las probabilidades de sobrevivir mediante la acumulación y conceptualización de las experiencias que permiten hacer predicciones.¹⁹ Nuevamente, el notable resultado es la capacidad de obtener y aprovechar una estructura que nos permita hacer predicciones. En las palabras del reconocido neurólogo colombiano Rodolfo Llinás (2002): “La capacidad de predecir el resultado de acontecimientos futuros –que es clave para los movimientos exitosos– es muy probablemente la principal y más común de todas las funciones del cerebro”.

Otra diferencia entre las computadoras tradicionales y el cerebro es la manera en que se incorpora el conocimiento que permite hacer predicciones y lidiar con la realidad. Esta diferencia introduce una dimensión dinámica a la definición de conocimiento y hace que nos concentremos en la dicotomía entre programar y capacitar. Una computadora puede seguir una asombrosa cantidad de reglas que se le dicten, y por lo general estas reglas lógicas consisten de algoritmos de sentencia condicional. La desventaja obvia de este método es el denominado cuello de botella del conocimiento, es decir, el hecho de que las reglas y causalidades primero deben ser definidas manualmente por un ingeniero. Por el contrario, la manera más fácil y efectiva de habilitar a un niño pequeño para que reconozca un automóvil consiste en mostrarle

¹⁸ “Lo que percibimos es una combinación de lo que sentimos y de las predicciones que hace nuestro cerebro sobre la base de la memoria” (Hawkins y Blakeslee, 2004).

¹⁹ Esto también significa que cuanto mayor es una persona, más influencia tiene de su experiencia y menos ingenua es; deja de ser tan tolerante y se hace más sesgada y prejuiciosa.

una selección de vehículos y dejar que el aprendiz encuentre los aspectos comunes. El isomorfismo no está predeterminado sino que es creado, y de esa manera el niño aprende cuál es la compleja combinación de características que constituyen un automóvil. Si al niño se le presentara una clasificación de modelos de automóviles constituida por normas, estaría compuesta de reglas como: “un coche tiene entre dos y cuatro puertas” y “un coche tiene entre 3 y 7 metros de largo”. De esta manera no se podría reconocer a un automóvil con acceso por el techo o un vehículo pequeño de 2 metros de largo. Sin embargo, un niño tiene una visión más flexible de lo que es un automóvil, y este concepto cambia con cada contacto que tiene con vehículos del mundo real. Este proceso está siendo imitado en las técnicas modernas de aprendizaje de máquina, como se explicará en un próximo capítulo sobre la inteligencia artificial más avanzada.

De esta manera se incorpora una dimensión dinámica a la definición de conocimiento. Si se ingresan los mismos datos un millón de veces en una computadora digital tradicional, normalmente producirá el mismo resultado un millón de veces, mientras no se la haya programado para que no lo haga. Por otro lado, un cerebro siempre está aprendiendo y con el mismo estímulo nunca producirá el mismo resultado, porque los seres humanos nunca tienen exactamente la misma experiencia dos veces. Las conexiones entre las neuronas cambian cada milésima de segundo y procesan la información de manera diferente. Los cerebros son dinámicos y las computadoras son estáticas; a las computadoras tradicionales hay que proporcionarles el conocimiento que necesitan para resolver ciertos problemas y ese conocimiento que reciben no es exclusivo para ellas. Esto hace que el paradigma digital sea tan importante: en cuanto una computadora posee una capacidad especial, todas las máquinas de Turing pueden tenerla, es decir, se puede copiar el programa. Pero los cerebros aprenden la mayor parte de las capacidades que utilizan a lo largo de la vida y el conocimiento incorporado tiene características únicas.²⁰ El conocimiento que contiene el cerebro se actualiza a cada momento a medida que cambia el entorno. Las computadoras pueden simular este concepto dinámico del conocimiento, por ejemplo mediante métodos *bayesianos*. Si bien el cerebro es muy efectivo en ajustar el conocimiento interno con nueva información, a veces es engañado, y en estos casos la inteligencia artificial es superior a la inteligencia humana (véase el recuadro 3.1).

Existen aún más diferencias entre los cerebros y las computadoras, pero el tema es mucho más amplio que el alcance de este libro. En síntesis: primero, el cerebro aprende principalmente en forma dinámica y continua, mientras que las computadoras tradicionales deben ser programadas; segundo, el cerebro almacena conceptos sig-

²⁰ La interrogante sobre la naturaleza y la magnitud de nuestra programación innata es tema de discusión. Sin embargo, dado que un potro se para y corre inmediatamente después de nacer, una tortuga recién nacida sabe perfectamente cómo llegar al agua, y los bebés cierran el puño cuando se tocan los labios, parece obvio que algunas funciones vienen programadas en el cerebro. Todavía no existe un consenso sobre si el cerebro humano posee una especialización innata para aprender y desempeñar tareas combinadas, como lo plantea Noam Chomsky con su gramática universal.

Recuadro 3.1

ESTADÍSTICAS BAYESIANAS PARA UNA ACTUALIZACIÓN DINÁMICA DEL CONOCIMIENTO

Cuando una persona aprende algo nuevo, puede reevaluar su conocimiento sobre un tema específico, y la nueva información puede afectar la manera en la que se relaciona a la realidad y predice el futuro. Cuando se reciben nuevos datos, este nuevo obstáculo para aplicar el algoritmo de respuesta puede llevar a que se lo revise. Los métodos *bayesianos* aportan una manera cuantitativa –mediante ecuaciones precisas– de revisar cálculos de probabilidad para poder tomar en cuenta la nueva información. Esta parece ser una noción clara que representa el eje central de cualquier solución informática, pero sin embargo todavía no cuenta con el apoyo de la mayoría de los académicos que trabajan con estadísticas (Baum, 2004; von Baeyer, 2004). Uno de los ejemplos más citados es el denominado “Problema de Monty Hall”, que tiene que ver con la teoría del juego y cuyo nombre se deriva del conductor de un programa de juegos conocido como “Let’s make a deal” (Hagamos un trato). En ese programa, se le pedía a un participante que seleccionara uno de tres cubículos cerrados para identificar en cuál cubículo había un automóvil. Después que la persona escogía, el conductor, quien sabía en cuál cubículo estaba el coche, abría la puerta de uno de los otros dos cubículos, que estaba vacío. Antes de que se revelara el resultado, el participante tenía la oportunidad de cambiar su opinión y desde el público le gritaban qué debía hacer (Weiner, 1998). Incluso muchos expertos en la teoría del juego fallaban, porque la intuición señala que como el automóvil podría estar en cualquier de los dos cubículos, la probabilidad de tener éxito es de 50 por ciento, por lo que no importa si cambiaba de opinión o se quedaba con su selección original. Según los métodos *bayesianos*, la posibilidad de ganar el vehículo aumentaba de un tercio a dos tercios si cambiaba de opinión, debido a la regla:

$$\Pr(A/B) = [(\Pr(B/A) * \Pr(A))/\Pr(B)]$$

La diferencia entre antes y después de que se abriera la puerta del cubículo vacío está en que el participante había recibido nueva información, que debía ser incorporada a la predicción. La lógica es evidente si repetimos el mismo ejercicio en una escala más grande. Imaginemos que no había tres sino mil cubículos, y que después que uno ha sido escogido, todos excepto el seleccionado y otro han sido abiertos y resultan estar vacíos. Nuevamente surge la pregunta de Monty: ¿cambiar o perseverar con la decisión original? Ahora queda claro que sería muy desventajoso no cambiar. La “nueva información” (aunque sea indirecta) da indicaciones que deben ser consideradas en el juicio en forma dinámica. Normalmente, cuando no juegue con Monty, el cerebro realiza este ajuste constantemente y en cada segundo.

Fuentes: Baum, Eric (2004), *What is Thought?*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press.
 Von Baeyer, Hans Christian (2004), *Information: The New Language of Science*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press.
 Weiner, Herb (1998), “Marilyn is tricked by a game show host”, Kitchen Wisdom Publishing (en línea) <http://www.wiskit.com/marilyn.gameshow.html>

nificativos en una jerarquía de diferentes niveles y los sustrae en muy pocos pasos, mientras que no sabemos cómo lograr esto con las computadoras tradicionales. Las redes neuronales artificiales son las más mencionadas como respuesta a este desafío, y cabe destacar que estas máquinas son muy diferentes a lo que comúnmente se define como computadora. Por tanto, la pregunta sobre si las computadoras y los cerebros son diferentes por naturaleza se reduce a la definición de computadora. No obstante, las redes neuronales artificiales más complejas conectan a un par de miles de neuronas en menos de una decena de capas, antes de convertirse en inmanejables. No debe sorprender que esta situación sea incomparable a los miles de millones de neuronas en el cerebro que parecen estar organizadas en varios niveles jerárquicos de todo tipo e interconectados. Aún no está claro cómo el cerebro logra ejecutar todas sus funciones, pero pareciera que el método de fuerza bruta de computadoras increíblemente veloces con procesadores y memorias separadas aplica un esquema diferente. Por eso en la situación actual del desarrollo humano las computadoras y los cerebros se complementan en su inteligencia.

e. Conclusiones sobre las sociedades de la información y del conocimiento

La información surge cuando los datos encajan en una red relacional que les da significado, y el conocimiento se entiende como un algoritmo compacto y dinámico que permite hacer predicciones; este algoritmo puede ser individual o colectivo, en el sentido de conocimiento de un agente específico (cerebro o computadora) o entre agentes (conocimiento organizativo). ¿Y los conceptos de sociedad de la información o sociedad del conocimiento?

Quienes defienden el concepto de sociedades de la información afirman que las tecnologías que impulsa el actual paradigma son las TIC digitales y que el componente dominante de las TIC son las redes digitales que hacen incrementar el movimiento de datos. Si presumimos que en general los individuos no envían datos que no tengan “algún significado” para ellos y que la mayor parte de los datos que circulan en las redes digitales tienen algún significado para la parte receptora, entonces podríamos asegurar que el contenido de estas redes es información. Esta información puede tener un valor económico, o cultural, de entretenimiento, familiar, social, educativo, entre muchos otros beneficios que puede obtener un ser racional e interesado en la utilidad personal. La circulación de información ha aumentado de manera considerable desde que se han instalado las tecnologías digitales; en el segundo capítulo de la próxima parte del libro se analizarán las características de este importante acontecimiento. Sin embargo, una creciente circulación de información no conduce automáticamente a un mayor caudal de conocimiento; por eso parece ser correcto el nombre “sociedad de la información”. Además, existen muchas otras maneras de mejorar la creación de conocimiento en una sociedad además de hacerlo mediante las TIC, como por ejemplo con la enseñanza tradicional y la aplicación de políticas sobre derechos de propiedad intelectual.

El argumento a favor del nombre “sociedades del conocimiento” se basa en que la actual forma de organización social y productiva no se caracteriza solamente por

los avances tecnológicos de las TIC (Unesco, 2005). Si bien esta afirmación es indiscutible, el concepto pierde su vínculo con las TIC y, por tanto, también se podría aplicar a otros paradigmas de la era de la ciencia y la tecnología. Todos los modelos de sociedad de la raza humana podrían calificarse como sociedades del conocimiento. Desde su aparición, el *homo sapiens* (hombre sabio) ha utilizado su capacidad para construir a nivel mental representaciones del mundo que lo rodea y para usar este conocimiento en la remodelación de ese entorno según sus intereses. Esta capacidad mental para captar la realidad y constituir isomorfismos compactos a partir de ella para aprovechar su estructura es la distinción más obvia entre la raza humana y otras especies, y la que hace a los humanos superiores. Una vez que la humanidad descubrió cómo utilizar el fuego, fue este conocimiento el que marcó la diferencia. Esta lógica parece haber cobrado más importancia durante la era de la ciencia y la tecnología que ha prevalecido en los últimos 225 años. La comprensión de las leyes de la física en el vapor y el aprovechamiento de sus ventajas en los motores impulsados por este medio; el manejo de la electricidad y su uso para alcanzar el desarrollo socioeconómico, y la utilización de motores a petróleo para mejorar el bienestar se caracterizan por el conocimiento que condujo a obtener los respectivos beneficios. Hoy son las TIC, a las que se define como la tecnología de uso general durante el quinto paradigma de la era de la ciencia y la tecnología. Por supuesto que las sociedades con un mayor caudal de conocimiento sobre cómo aprovechar las oportunidades poseen importantes herramientas para mejorar su bienestar. Obviamente, de esta manera se pone en tela de juicio la descripción del actual paradigma como un paradigma que se caracteriza especialmente por el conocimiento.

Se podría afirmar que las TIC son más que redes que transmiten información y que, como se ha discutido en este capítulo, también han derivado en soluciones tecnológicas que contienen conocimiento. La posibilidad de crear algoritmos artificiales y constituir estos procesos inteligentes en soluciones tecnológicas implica que los sistemas mismos de TIC se convierten en parte del proceso de conocimiento. Además, la mayor circulación de información también puede contribuir a acelerar la creación de conocimiento, porque la información es un ingrediente básico de este proceso que ciertamente no es lineal ni automático; sin embargo, las pruebas negativas demuestran que si no circula la información, no se produce conocimiento alguno. En este sentido, se podría justificar el nombre de “sociedades del conocimiento”, si se destaca que la meta final de una mayor circulación de información y los avances de las TIC aceleran significativamente la frontera del conocimiento, una frontera que se mueve constantemente.

No cabe duda de que hasta el momento el aumento en la circulación de información mediante el uso de las TIC es mucho más visible que los avances en la creación de inteligencia artificial. Uno de los resultados es el muchas veces lamentado exceso de información, que ha sido característico del paradigma digital; el intercambio de información aumentó y el procesamiento inteligente de esa información no se mantuvo al mismo ritmo. Por ejemplo, mientras con un ancho de banda cada vez mayor las casillas de correo electrónico se saturan, todavía se investiga cómo aplicar filtros inteligentes que prelean los mensajes, los clasifiquen de acuerdo con la urgencia e

importancia y utilicen la información recibida directamente para ejecutar acciones consecutivas. Las aplicaciones de TIC más reconocidas se han constituido sobre la base de soluciones de inteligencia artificial. Google y otros buscadores de internet son ejemplos de conocimiento artificial. Google es un algoritmo compacto y dinámico que permite extraerle un significado a los datos, y que podría “saber” más sobre la humanidad que cualquier ser humano. Al mismo tiempo, las recomendaciones de productos que se efectúan mediante tiendas virtuales como Amazon, “conocen” los intereses de los clientes mejor que cualquier vendedor, porque se basan en algoritmos creados para analizar enormes bases de datos sobre las preferencias de los clientes. Si bien se notan los avances, la percepción general es que aún queda camino por recorrer para lidiar de manera efectiva con el exceso de información y extraer conocimiento de esta información de manera inteligente. Por eso sería mejor vivir en una sociedad del conocimiento, pero la realidad demuestra que la sociedad de la información aún es la que predomina.

SEGUNDA PARTE

TRAYECTORIAS TECNOLÓGICAS DE LAS TIC

Según una de las reflexiones de sentido común que siempre se le atribuyen a Winston Churchill, cuanto más atrás se mire más se podrá ver. En este capítulo se ahondará en las trayectorias tecnológicas pasadas de las TIC para poder evaluar las futuras tendencias. Las soluciones tecnológicas al servicio de la información y de las comunicaciones se remontan al tiempo del surgimiento del *homo sapiens*. Al “hombre sabio” se lo identifica como la primera especie que ha utilizado los pensamientos simbólicos para comunicarse, y lo ha hecho mediante lenguaje combinado, murales en cavernas u otros símbolos rituales o piezas de arte. La evolución de estas tecnologías es inseparable de la evolución de la historia de la humanidad; antes de presentar las trayectorias tecnológicas específicas de TIC, es decir, los patrones evolutivos de tecnologías que captan e interoperan, transmiten, procesan y almacenan información, se repasará la teoría del progreso técnico. De esta manera se establecerá el marco y se ofrecerá el necesario entendimiento sobre cómo conceptualizar la tecnología desde una perspectiva dinámica y evolucionista.

4. TEORÍA DEL PROGRESO TÉCNICO¹

Cada una de las diferentes tecnologías que actualmente están convergiendo en los sistemas de TIC digitales posee su propio patrón evolutivo, caracterizado por períodos específicos con determinados diseños predominantes. En cada uno de ellos se puede observar una secuencia de funciones en forma de ondas. Según la conocida interpretación de Dosi (1988) sobre el número infinito de trayectorias de ondas entrelazadas que proponía Schumpeter, “con un análisis más agudo de los patrones del progreso técnico se infiere la existencia de paradigmas con diferentes niveles de generalidad, en diferentes sectores industriales”. En este sentido, la tecnología de uso común de cada paradigma específico dentro de la era de la ciencia y la tecnología puede ser subdividida en los diversos subsistemas técnicos en los que se basa; en el caso del paradigma digital son cuatro: interoperación, transmisión, procesamiento y almacenamiento de información. Todos ellos están sujetos a la naturaleza del progreso técnico que crea los senderos de innovación identificables para cada tarea. A continuación se describirá la lógica de esas trayectorias tecnológicas.

a. Búsqueda de respuestas para preguntas pendientes y de soluciones necesarias

Teóricamente, frente a los procesos científicos de resolución de problemas como los que ha planteado Kuhn (1962) hay un sinnúmero de posibilidades para establecer un nuevo paradigma tecnológico, según el sentido que le ha dado Dosi (1984). Se hace necesario un proceso de selección de las innumerables invenciones e innovaciones,²

¹ Este capítulo ha sido escrito por Martin Hilbert, de la Cepal.

² Según la distinción de Schumpeter, una invención es una idea mediante la cual se puede obtener un producto, bien o servicio nuevo y mejorado significativamente, mientras que una innovación se trata de su implementación, y también se puede referir a un nuevo método de mercadeo o de organización empresarial, del lugar de trabajo o relaciones externas (OCDE/Eurostat, 2005). En este sentido, los científicos de diferentes disciplinas pueden hacer millones de invenciones, pero sólo algunas serán implementadas y llegarán a la luz pública.

que es determinado por las variables físicas y socioeconómicas, como se adelantó en señalar Rosenberg (1963, 1969) cuando investigaba el funcionamiento en la industria de la máquina-herramienta, incluyendo la tecnología utilizada para fabricar el famoso revólver de Samuel Colt. Así es como se pueden observar “trayectorias naturales” (Nelson y Winter, 1977) o “avenidas de innovación” (Sahal, 1981) en la evolución de un sistema tecnológico específico. Los senderos de la investigación tecnológica se distinguen por las limitaciones en la *construcción física* de la tecnología y en las *señales socioeconómicas* de sus creadores y usuarios, que dirigen o detienen la evolución.

Por un lado, todas las tecnologías están limitadas por las *compensaciones básicas de las ciencias naturales*, como las leyes de la física. Las características tecnológicas de un sistema pueden ser explicadas como un vector en un parámetro del espacio n-dimensional, que está compuesto de una serie de parámetros n-lineales de propiedades físicas, como espacio, tiempo y masa (Sahal, 1985b). Un solución tecnológica puede resolver los problemas que surjan del respectivo paradigma mediante una combinación específica de estas propiedades en el sistema físico disponible, es decir, se puede utilizar material más pesado o más liviano, se puede hacer más grande o más pequeño, se puede ir más rápido o más lento. Si ocurren cambios en el abanico de parámetros, se logran nuevos productos que se definen como innovaciones. Sahal (1985a) define una trilogía:

- *Innovaciones estructurales* que surgen de un proceso de crecimiento diferencial, dentro de una combinación de parámetros donde los diferentes aspectos del sistema tecnológico no crecen al mismo ritmo. En este caso el espacio n-dimensional de las propiedades físicas no cambia, pero la variable se desplaza a lo largo de las líneas y encuentra un nuevo equilibrio que conduce a una nueva tecnología. Por ejemplo, la cantidad de acero que se usa en un vehículo de transporte se puede reducir, y de esa manera se alcanzaría una mayor velocidad a costa de la estabilidad.
- *Innovaciones materiales* que tengan que ver con un cambio en los insumos de construcción; por ejemplo, el reemplazo del acero por aluminio.
- *Innovaciones de sistemas* que surgen de la integración de dos o más tecnologías simbióticas con el propósito de simplificar la planificación del diseño general. En este caso se incorporan nuevas variables en los sistemas tecnológicos y otras son reemplazadas. El resultado es un nuevo espacio de parámetro n-dimensional, como por ejemplo cuando las ruedas de los trenes son reemplazadas por sistemas electromagnéticos de levitación.

Se han elaborado muchas taxonomías similares en la literatura con diversos nombres y terminología, como innovaciones incrementales, que son parecidas a las que Sahal denominó innovaciones estructurales; innovaciones radicales, relacionadas a los cambios de material, y los llamados cambios de sistema tecnológico, que son las innovaciones de sistemas de Sahal (véase, por ejemplo, Freeman y Pérez, 1988).

Sahal (1981) demuestra que la tecnología de los medios de transporte, como los aviones, y la tecnología empleada en los tractores están vinculadas por el comúnmen-

te llamado coeficiente peso-potencia de los objetos en movimiento. Las mejoras en la tecnología del transporte se derivan de una combinación de innovación estructural, material y de sistemas en un proceso de aprendizaje a escala dentro de los límites de esta compensación. Los ingenieros no se sorprenden por esto, ya que el movimiento de la masa depende de las leyes del movimiento de Newton: F (fuerza) = a (aceleración) * m (masa). Cada variable puede ser reemplazada acorde con las reglas de la física; con las innovaciones estructurales y materiales, el espacio de parámetro multidimensional que presentan estas leyes puede ser aprovechado (por ejemplo, la aceleración se puede incrementar al optimizar el motor, y las partes del vehículo pueden ser fabricadas de acero o de cobre). Las innovaciones de sistemas tienen un papel clave, como el reemplazo de la tecnología de aviación basada en motores a pistón y hélices por la tecnología de propulsión a chorro. Sin embargo, en general el progreso técnico está limitado por las leyes fundamentales del mundo natural, sin importar si la tecnología se aplica para el transporte acuático, terrestre o aéreo, con aletas, ruedas o alas, y mediante el uso de cualquier fuente de energía, velocidad o capacidad. Ninguna de ellas escapa a las compensaciones de Newton. “En esencia, el mismo proceso con el que se inicia la evolución de un sistema eventualmente limita su evolución” (Sahal, 1985a).

Además de las limitaciones del mundo físico, la constelación específica de una tecnología es determinada por *factores socioeconómicos* en al menos dos maneras. Si bien su efecto no se comprende totalmente, estos factores parecen definir la dirección del proceso de resolución de problemas; además, parecen influir en el detenimiento de la evolución tecnológica en un punto específico de la implementación y la difusión de la invención. Schmookler (1966) dio origen a un largo e infructuoso debate sobre la naturaleza exógena o endógena del progreso técnico, que condujo a la terminología de los llamados “empuje tecnológico” (*technology push*) e “inflación de demanda” (*demand pull*) como las fuentes más importantes de la innovación. Mientras que con el primer enfoque se afirma que el motor del progreso técnico es una especie de *deus ex machina* exógena, neutral e impredecible, con el segundo se cuestiona la autonomía del proceso de investigación y se incorpora el concepto de señales de mercado que producen una demanda y dirigen la evolución. Es natural que la mayoría de los científicos e ingenieros estén empeñados en convertir los metales básicos en oro, y no a la inversa.³ No obstante, un modelo en el cual la demanda es la explicación del fenómeno entero ciertamente tampoco es completo, ya que las necesidades de la gente son infinitas y, por tanto, la demanda del mercado por sí sola no puede ser la explicación de por qué se produce una cierta innovación en un cierto momento (Dosi, 1984). Un sinnúmero de variables socioeconómicas influyen en la dirección y la naturaleza de la trayectoria en una combinación de empuje tecnológico e inflación de demanda.

³ Cabe mencionar que hay cada vez más premios para investigaciones e invenciones que parecen ser inútiles, como el IgNobelPrize (premio inmerecido) (Annals of Improbable Research, 2006). De todas maneras, se puede asegurar que el conocimiento adquirido con esas investigaciones aparentemente inútiles no puede ser luego aplicado para diferentes propósitos y para satisfacer una demanda.

Está claro que la constelación de variables del espacio de parámetro multidimensional está restringida por la disponibilidad de recursos en el proceso de búsqueda. Algunos materiales pueden ser los más adecuados para una solución tecnológica específica, pero también pueden resultar demasiado caros para los investigadores. Tal vez otros insumos estén disponibles a pequeña escala, pero la invención no es viable a nivel comercial. Las instituciones socioeconómicas, las reglamentaciones y los incentivos, como los derechos de la propiedad intelectual y la legislación sobre la competencia, también influyen en la conducta de los actores que definen la trayectoria tecnológica, y viceversa (Pérez, 2001), además de los acontecimientos políticos como las guerras o los antecedentes históricos y la cultura (Rosenberg, 1976). Como se ha reconocido ampliamente en la literatura sobre la innovación, el progreso técnico es acumulativo y local (Cimoli y Dosi, 1995); es acumulativo porque el desarrollo tecnológico se construye sobre la experiencia que se ha tenido en la innovación (aprendizaje), y es local porque es probable que esto ocurra en el entorno de las tecnologías que se están usando en ese momento. El entorno no se define necesariamente por la geografía, sino también por un grupo de gente, un sector del nivel más avanzado o las creencias de un cierto conjunto de científicos.

La inercia y la dependencia de la trayectoria pasada en la selección de las soluciones tecnológicas se acentúa por lo que se conoce como el esquema dominante (Utterback y Abernathy, 1975). El esquema dominante tiene el efecto de reforzar la aplicación de un cierto estándar de costo y rendimiento en el respectivo rubro, lo que conduce a una competencia nivelada entre empresas y crea confianza en el consumidor, porque se espera que un producto satisfaga los requisitos de ese esquema. Antes del surgimiento de un esquema dominante, sus características pueden ser aplicadas por separado en diversos productos, que no son diseñados a medida ni para un nicho del mercado en particular. Por ejemplo, las versiones de la máquina de escribir que se fabricaban antes del siglo XX por lo general tenían sólo teclas con letras mayúsculas; la posibilidad de escribir con letras mayúsculas y minúsculas fue una modificación especializada que se añadió más tarde. El primer cambio llegó con una máquina llamada Underwood modelo 5, y pronto comenzó a convertirse en el modelo dominante, ya que los clientes comenzaron a definir una máquina de escribir como un dispositivo que debía tener teclas para mayúsculas y minúsculas. También tienen estas características los sistemas digitales de edición de texto como el diseño WYSIWYG que fue promovido por Xerox a finales de los años setenta, o los sistemas operativos que funcionan mediante la gestión de diferentes ventanas. Las tecnologías a menudo son más rentables cuando son incorporadas y luego se aprende al usarlas, ya que cuanto más experiencia se acumula, más se las puede mejorar (Rosenberg, 1982). Los usuarios están cada vez más restringidos a una solución específica, ya que cuanto mayor es el uso y la facilidad para utilizar una cierta tecnología, los costos para cambiarla se hacen demasiado altos. Esta dependencia de la trayectoria pasada de un cierto diseño o esquema también puede llevar al proceso en una dirección que no es óptima. Una tecnología específica puede limitar el mercado de posibles usuarios y hacer que no se incorporen soluciones más avanzadas (David, 1985).

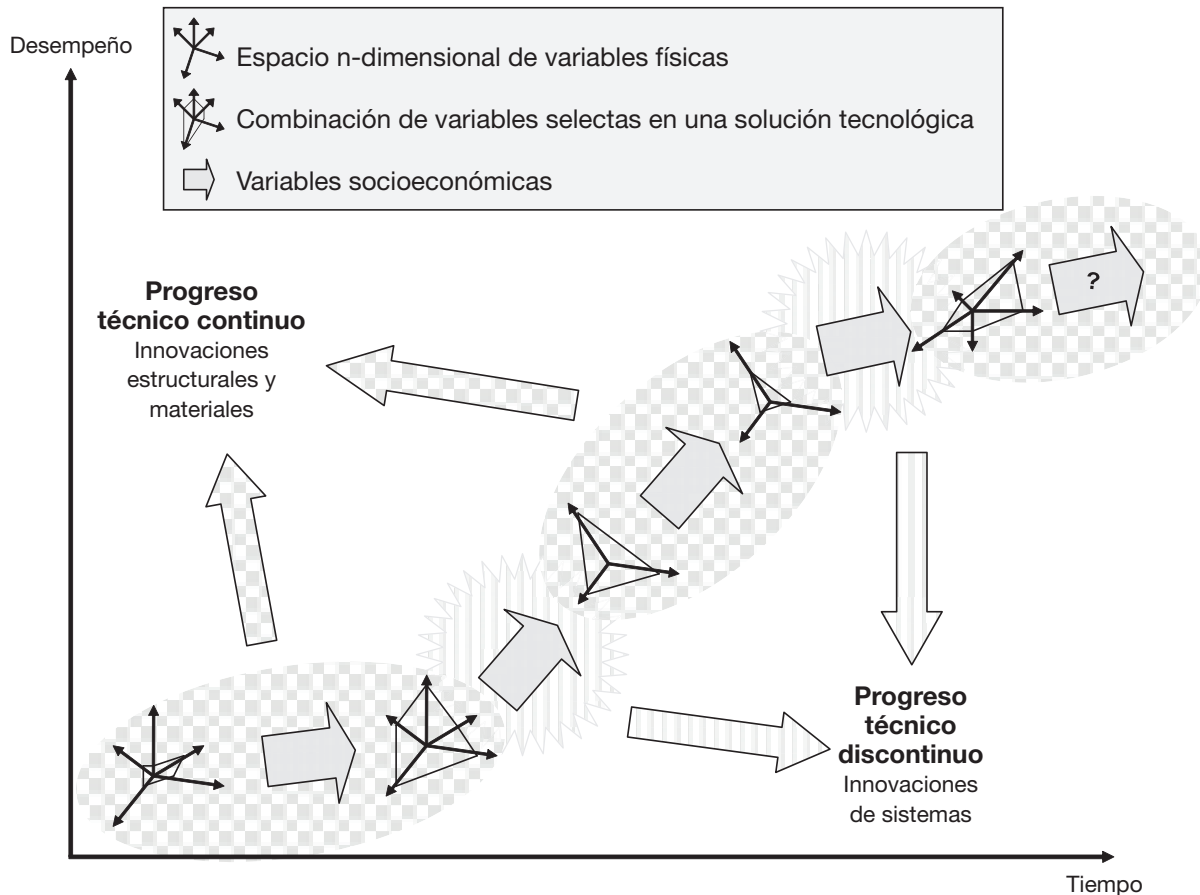
En la evolución de las soluciones técnicas, los economistas por lo general destacan el rol de la suerte y las casualidades en la compleja y muchas veces incoherente dinámica entre el empuje tecnológico y la inflación de demanda. Los “accidentes históricos” tienen una fuerte influencia en este proceso, y lo que a primera vista podrían parecer “acontecimientos sin importancia” resultan ser hitos decisivos que determinan el curso de la trayectoria tecnológica (Arthur, 1989). La estructura no ergódica del proceso tecnológico que surge hace recordar al efecto mariposa de la teoría del caos. Teóricamente, el movimiento de las alas de una mariposa puede provocar cambios muy pequeños en la atmósfera que finalmente causan un tornado del otro lado del planeta, e influyen en la trayectoria de desarrollo socioeconómico y, por tanto, técnico de la sociedad afectada. En la práctica, sería imposible señalar la causa de este resultado; cada efecto se convierte nuevamente en otra causa, porque todo está relacionado a todo. Como la identificación de la relación causa-efecto está muy limitada en la práctica, no se ha logrado elaborar una teoría completa sobre el progreso técnico y tal vez nunca sea posible debido a las innumerables posibilidades de influencia mutua que afectan la evolución de los sistemas tecnológicos. Para el futuro cercano se puede prever que los códigos incomprensibles de las relaciones entrelazadas de causa y efecto seguirán siendo calificados como “aleatorios” y sujetos a la “suerte” y la “casualidad”.

b. Trayectorias tecnológicas

Si bien no se comprenden las causas exactas, las nuevas trayectorias tecnológicas se hacen visibles *ex post*. Como resultado de la interacción entre el empuje tecnológico dentro de diferentes sistemas físicos y la inflación de demanda de señales socioeconómicas, el progreso técnico se caracteriza por tener etapas *continuas* y *disruptivas* (véase el gráfico 4.1). Las innovaciones de sistemas conducen a descubrimientos que marcan hitos para los cambios de paradigma tecnológico; en medio de esos hitos la trayectoria atraviesa un proceso gradual de optimización de un cierto sistema mediante innovaciones estructurales y materiales (Sahal, 1981). El espacio multidimensional de parámetros de las propiedades físicas define las posibilidades con las que se implementa una cierta tecnología, y el ritmo de progreso con el que las compensaciones de ese nuevo espacio de parámetros del sistema es explorado también es dirigido por una combinación de empuje tecnológico e inflación de demanda. A nivel conceptual, las tecnologías más avanzadas o la llamada frontera tecnológica pueden considerarse como una superficie en el espacio multidimensional de parámetros de las propiedades físicas que definen al sistema tecnológico más valioso (Dodson, 1970). Las consideraciones socioeconómicas determinan cuál parámetro se toma más en cuenta y cuál se sacrifica; así se marcan los puntos de intersección en cada eje del espacio multidimensional de parámetros y el *Gestalt* final de la superficie de compensación. El progreso en la frontera tecnológica significa que se puede mejorar más de un parámetro sin sacrificar ninguno, o sin sacrificar demasiadas de las ventajas que han aportado los otros parámetros (Alexander y Nelson, 1972). Esto también quiere decir que una nueva solución tecnológica puede ser inferior a la anterior en algunos aspectos.

tos de su rendimiento (Sahal, 1978). Sin embargo, por definición, los beneficios socio-económicos incrementan cuando hay progreso en la frontera tecnológica; un proceso de progreso continuo consiste en explorar las posibilidades de un nuevo esquema, lo que conduce a varias generaciones de una cierta tecnología, todas producidas sobre la base de la misma lógica y dentro del mismo espacio multidimensional de parámetros de compensaciones físicas. El mejoramiento del paradigma tecnológico establecido continúa hasta que los límites físicos, la casualidad o cualquier factor socio-económico deriven en la superioridad de un nuevo sistema que satisfaga la misma promesa de manera más avanzada. Cuando se produce una innovación, el nuevo sistema es definido por un espacio multidimensional de parámetros de propiedades físicas relacionadas. La nueva solución propuesta por el paradigma general sigue una lógica diferente, pero como aborda el mismo problema y satisface la misma promesa básica, es parte de la misma trayectoria, sólo que más avanzado. En el gráfico 4.1 se observan los aspectos básicos de esta teoría del progreso técnico.

Gráfico 4.1
TRAYECTORIA TECNOLÓGICA CON PROGRESO CONTINUO Y DISCONTINUO



Fuente: elaboración propia.

La nueva trayectoria tecnológica posee un cierto grado de dispersión y desviación con respecto a la trayectoria media. Las soluciones temporales sirven de guía para un progreso técnico continuo que es válido hasta que se alcanza y se acepta una solución superior. El entorno físico en el que se desarrolla la resolución del problema proporciona los límites del camino general de innovación, pero les da a los ingenieros suficiente espacio para elaborar soluciones particulares que no se suceden en línea recta. En este sentido, una solución tecnológica específica es parte de una generación de soluciones que tiene ciertas características y mejora mediante el progreso que ocurre dentro del mismo sistema (por ejemplo, los discos de vinilo, diferentes tipos de case-tes o diversos modelos de discos compactos, entre otros), sin que esto signifique que no forma parte de un paradigma general mayor, que incluso trasciende a los cambios discontinuos de las generaciones que satisfacen la misma promesa (como los dispositivos para grabar y escuchar música). De la misma manera, como se explica más adelante, la solución de la promesa de procesar información mediante el uso de dispositivos artificiales ha sido abordada por cambios consecutivos de paradigma de soluciones mecánicas como el ábaco chino (antes de 1857), sistemas electromecánicos con tarjetas perforadas (1857-1933), relés (1933 y 1946), tubos de vacío (1946-1955), transistores (1955-1973) y finalmente, aunque no será el último, mediante circuitos integrados y microprocesadores. En estos seis paradigmas más recientes se observa una trayectoria acumulada coherente con una mejora de rendimiento y todas son parte de un paradigma de nivel superior, lo que responde la interrogante de cómo procesar información de manera artificial.

Una combinación de factores socioeconómicos le da rumbo al proceso. Mientras el caudal de conocimiento siga aumentando a medida que pasa el tiempo, es decir, a medida que se acumulen los logros y no se olviden, el proceso es irreversible. Se presume que el índice de “olvido” es bajo con respecto al índice de aprendizaje (Alexander y Nelson, 1972); por tanto, el rendimiento mejora a medida que pasa el tiempo, siguiendo los movimientos de la frontera tecnológica. El punto exacto en el que esta evolución se detiene y se convierte en una solución tecnológica medianamente popular depende de una compleja combinación de variables socioeconómicas. La naturaleza acumulativa del aprendizaje garantiza la evolución del desarrollo, sin que exista la posibilidad de que se produzcan saltos desproporcionados de un punto a otro punto demasiado distante.

c. Medición del progreso técnico

A veces se denomina tecnometría a la disciplina dedicada a medir y evaluar el progreso técnico (Sahal, 1985b; Coccia, 2005). Surgió en la década de 1950 y se la aplica para fomentar el uso de métodos estadísticos en las ciencias exactas como física, química e ingeniería.⁴ La planificación de las diversas soluciones tecnológicas por lo general

⁴ Véase, por ejemplo, American Statistical Association (*s/f*).

está vinculada a su rendimiento en un área específica y en un momento determinado, y debe contemplar varios factores.

El primero de esos factores tiene que ver con los índices de rendimiento seleccionados como variables para medir el progreso técnico. Como con todas las mediciones, los diferentes métodos aplicados se concentran en el diseño y la funcionalidad del sistema o en su rendimiento e impacto. Por ejemplo, al medir la funcionalidad y el diseño, se observaría si la comunicación es móvil o de red fija, y si se trata de memoria RAM o memoria ROM. Debido a que existen muchos aspectos de la funcionalidad, parece más aconsejable optar por un indicador de impacto, como la cantidad de información transmitida o almacenada, e inevitablemente la especificación de este indicador se verá influida por el paradigma dominante. Esto es difícil de evitar, ya que “una serie de convicciones... [y una] serie de acuerdos sobre cómo se deben entender los problemas” (Kuhn, 1962) invariablemente influyen en nuestra interpretación de la realidad.

En el caso del paradigma digital, la unidad común de medición es el *bit*. La inclusión de soluciones tecnológicas de paradigmas anteriores exige una interpretación del rendimiento de soluciones previas según los indicadores de rendimiento del paradigma digital, medido en *bits*. En este caso se deben tomar decisiones como calcular cuántos *bits* pueden ser almacenados en una hoja de papel, o la cantidad de *bits* por segundo que se podrían transmitir con el telégrafo de Morse. El caso de la computación requiere atención especial; debido a que una computadora construida con el diseño universal de Turing ejecuta diferentes operaciones informáticas como la lectura de la memoria y la transformación de la información, es pertinente realizar pruebas comparativas agregadas de su rendimiento general en una función específica (Gray, 1993). En lugar de medir las variables aisladas del rendimiento de la computadora (tasa de transferencia, latencia o velocidad del reloj) la alternativa común es usar una combinación ponderada de diferentes indicadores en un índice agregado de rendimiento, como el tiempo que se demora en ejecutar una función específica. Esos indicadores pueden ser combinados con indicadores socioeconómicos. La consideración de la relación precio-calidad de los sistemas de TIC se utiliza a menudo como sustituto para el índice de innovación, utilidad y potencial difusión de la tecnología.

Un segundo aspecto tiene que ver con el momento en el que se va a medir el rendimiento. La teoría nos enseña que se pueden diferenciar todo tipo de innovaciones en las diferentes etapas del desarrollo tecnológico, incluso su concepción científica (la idea), implementación técnica (la presentación del prototipo), implementación comercial (con un diseño cada vez más evolucionado), y su difusión (características socioeconómicas de oferta y demanda) (OCDE, 2002). La fecha de la concepción científica de una tecnología casi nunca es evidente, mientras que las diversas variables socioeconómicas que influyen en su difusión son difíciles de evaluar de una manera uniforme. También es difícil asignar un momento a la etapa de difusión, porque ésta depende del concepto discutible de índices de penetración. Las fechas que se pueden definir más fácilmente son las de implementación técnica y comercialización.

Si se aplica la teoría de progreso técnico que se ha presentado, se puede esperar que tecnologías específicas sigan un proceso de progreso continuo, acorde con las in-

novaciones estructurales y materiales del aprendizaje a escala, con sistemas tecnológicos que se reemplacen unos a otros y que conduzcan a un progreso técnico discontinuo y a los llamados cambios de paradigma. Cabe señalar que cuando se evalúe el rendimiento de las diferentes soluciones tecnológicas en el eje Y, y del tiempo en el eje X, se puede esperar un nivel considerable de dispersión. Esto concuerda con la teoría y representa variables socioeconómicas que definen el detenimiento de la evolución tecnológica en un punto específico, además de los acontecimientos discontinuos durante los cambios de paradigma.

5. EVOLUCIÓN EN LA CAPTACIÓN Y LA INTEROPERACIÓN⁵

La humanidad siempre ha utilizado tecnologías para capturar y difundir información por medio de distintas soluciones tecnológicas, entre ellas el papiro, el papel, las señales de humo y las fotografías. De esta manera, se ha adaptado la información de un formato a otro para poder difundirla más ampliamente, almacenarla y manipularla. En el paradigma digital, la información se transforma al código binario, y así se la transmite, procesa y almacena; la conversión a este estándar común permite llevar a cabo todas estas operaciones básicas sobre una misma base de representación y constituye una convergencia hacia el *bit*, que ha hecho aumentar significativamente la cantidad de información que existe en el mundo.

En la Universidad de California en Berkeley se realizaron dos estudios pioneros en 2000 y 2003 para calcular la cantidad de información que existe en el mundo (Lyman y Varian, 2000; Lyman, Varian y Swearingen, 2003). Se estimó que en 1999 se producía 1,5 exabytes de información en todo el planeta (1.500.000.000 de gigabytes) y que este número fue más que duplicado en 2002, para el cual se calcula 5 exabytes. La empresa de almacenamiento EMC repitió este ejercicio sobre 2006 con la ayuda de IDC (Internet Data Center, 2007) y estimó que en ese año ya se producían 40 exabytes de información, lo que correspondería a aproximadamente 750.000.000 de veces la información que contienen todos los libros escritos durante la historia de la humanidad. Si bien las metodologías utilizadas en este tipo de estimaciones siempre son cuestionables, queda claro que los avances en las posibilidades de capturar información a través de sensores y de desplegarla mediante interfaces de usuario, han tenido un gran impacto en la cantidad de información existente en menos de una década. Por tanto, las llamadas sociedades de la información y del conocimiento se caracterizan por un aumento explosivo en la cantidad de información, es decir, de datos con significado.

A continuación se presentan algunas estimaciones de la cantidad de información digital existente en el mundo. Según la esquematización de las cuatro funciones infor-

⁵ Este capítulo ha sido escrito por Martin Hilbert, de la Cepal, y Priscila López y Cristian Vásquez, de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile.

máticas básicas, la captura y la interoperación se presentan de acuerdo con su relación con cada una de las otras tres funciones. En otras palabras, se presenta la cantidad de información capturada e interoperada para su posterior transmisión, computación y almacenamiento; y se limita el cálculo a las tecnologías más cercanas al paradigma digital, como la telefonía fija y móvil, internet, las computadoras personales de escritorio y portátiles, y los discos duros como dispositivos de almacenamiento digital. Se ha establecido este límite para evitar que sea necesario hacer demasiadas estimaciones y aproximaciones sobre la cantidad de *bits* contenida en hojas de papel y otras soluciones no-digitales similares, dado que se supone que la cantidad de información en soluciones de este tipo no ha cambiado significativamente durante los últimos años, por lo menos no tanto como la información digital, que es la razón del actual cambio paradigmático. De esta manera, es posible hacer estimaciones simples y suficientemente transparentes, que se centran en el mejor rendimiento de las TIC modernas. Además, por razones prácticas, se considera el potencial total de las tecnologías, suponiendo que éstas funcionan durante 24 horas los 365 días del año. En este sentido, se estima la capacidad tecnológica máxima instalada en el mundo para los diferentes años. Las notas metodológicas de las estimaciones pueden ser encontradas en línea en el documento (Hilbert, López y Vásquez, 2008).⁶

a. Capacidad de recibir información transmitida en el mundo

Además de las soluciones basadas en papel, existen dos soluciones tecnológicas masivas para transmitir información: la radioteledifusión (*broadcasting*) y las telecomunicaciones. Si bien es cierto, la distinción entre estas dos ha sido muy marcada en las últimas décadas, la convergencia hacia el *bit* la está haciendo cada vez más difusa. La radioteledifusión es un modo de transmisión en el que un nodo emisor envía simultáneamente información a una multitud de nodos receptores, sin necesidad de reproducir la misma transmisión nodo por nodo, como ocurre en las telecomunicaciones. Una de las diferencias más notables entre ambas soluciones es que la radioteledifusión es básicamente una tecnología unidireccional, que difunde información de forma amplia, como lo sugiere su nombre en inglés (*broad*: amplio; *cast*: alcance); mientras que las tecnologías de las telecomunicaciones permiten el intercambio bidireccional de información.

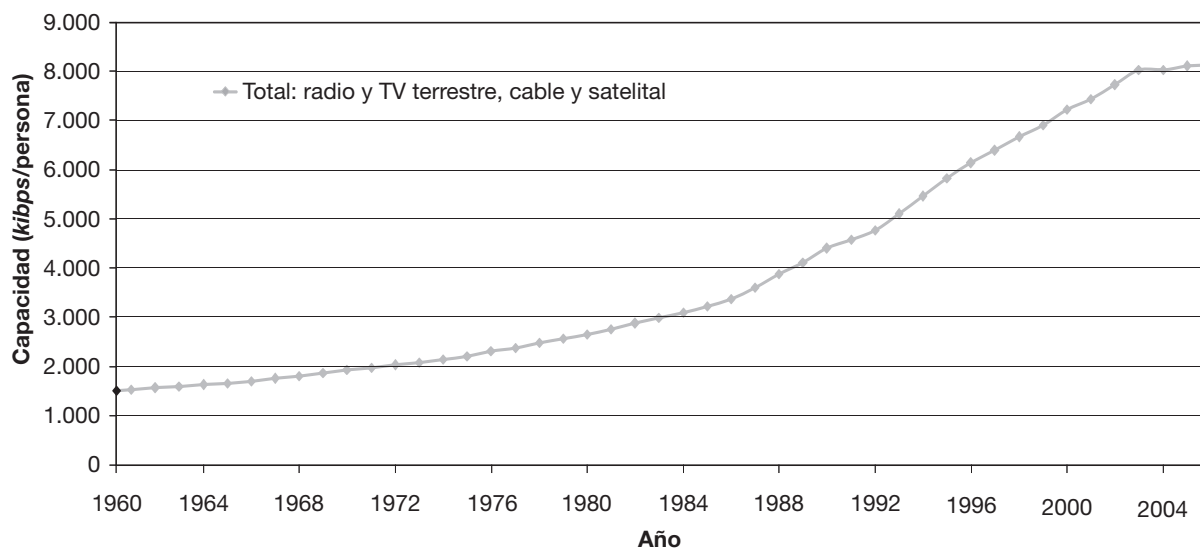
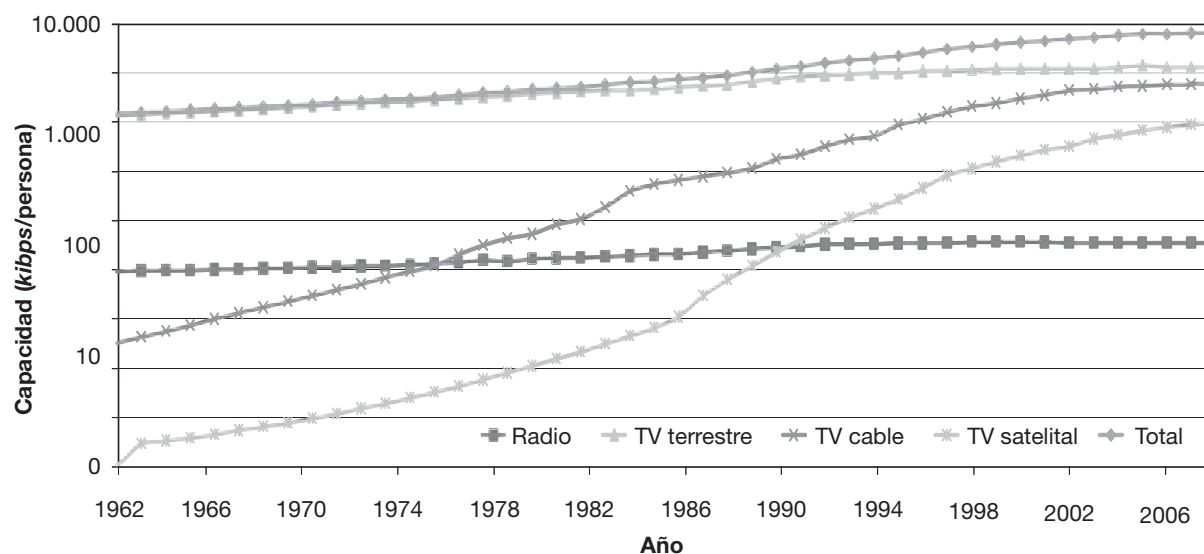
Como se puede observar en el gráfico 5.1, la cantidad de información que se transmite mediante la radioteledifusión ha aumentado exponencialmente desde los años sesenta. En 1960 había una capacidad instalada para transmitir 1.506,87 *kibit/s*/persona,⁷ mientras en 1990 ya se transmitían 4.403,27 *kibit/s*/persona y en 2006 el mundo

⁶ *online*: <http://www.martinhilbert.net/Appendix-how-much-info.pdf>

⁷ Con el fin de resolver la ambigüedad con respecto al prefijo “kilo” utilizado en la medición de la capacidad en las tecnologías de almacenamiento y comunicación, que tradicionalmente corresponden a 1.024 y 1.000 *bits*, respectivamente; se opta por medir las tasas de transmisión en *kibibit* por segundo [*kibps*] (1.024 *bits* por segundo) y *mebibit* por segundo [*Mibps*] (10.242 [*bps*]), haciendo comparables las unidades.

Gráfico 5.1

**CAPACIDAD DE RECIBIR INFORMACIÓN
TRANSMITIDA POR RADIOTELEDIFUSIÓN POR
PERSONA 1960-2006, TOTAL Y POR TECNOLOGÍA**

a. Capacidad total radioteledifusión, 1960-2006**b. Capacidad de transmisión de radio y televisión, 1960-2006**

Fuente: elaboración propia (véase el anexo de notas metodológicas).

contó con una capacidad para transmitir información por redes de radiotelevisión equivalente a 8.142,67 *kibit/s/persona*. La capacidad tecnológica que más ha crecido es la difusión de información por medio de televisión abierta, debido principalmente al aumento en el número de aparatos receptores. También se observa un incremento importante en la difusión de televisión por cable, debido al aumento en el número de abonados a este servicio. Cabe destacar que el gráfico detallado es presentado en una escala semilogarítmica.

Un desarrollo incluso más explosivo se ha visto en la capacidad de intercambiar información. La historia de internet comienza en 1969 con la planificación de una red destinada a conectar computadoras remotas que eran utilizadas principalmente para fines militares. A partir de esta idea se gestan Arpanet y los diferentes protocolos de comunicaciones que permiten el intercambio de información entre las computadoras conectadas a la red, además del primer servicio: el correo electrónico (1972). La consolidación se inicia en 1983, cuando Arpanet se independiza de la red militar que le dio origen y se producen las primeras interconexiones entre los distintos tipos de redes presentes en los diferentes continentes, con lo que se logra un alcance global que no se había contemplado en un principio. Se debe destacar que, hasta este punto, el uso de internet estaba limitado y sólo quienes pertenecían a alguna universidad, organismo de gobierno o institución militar podían acceder a ella.

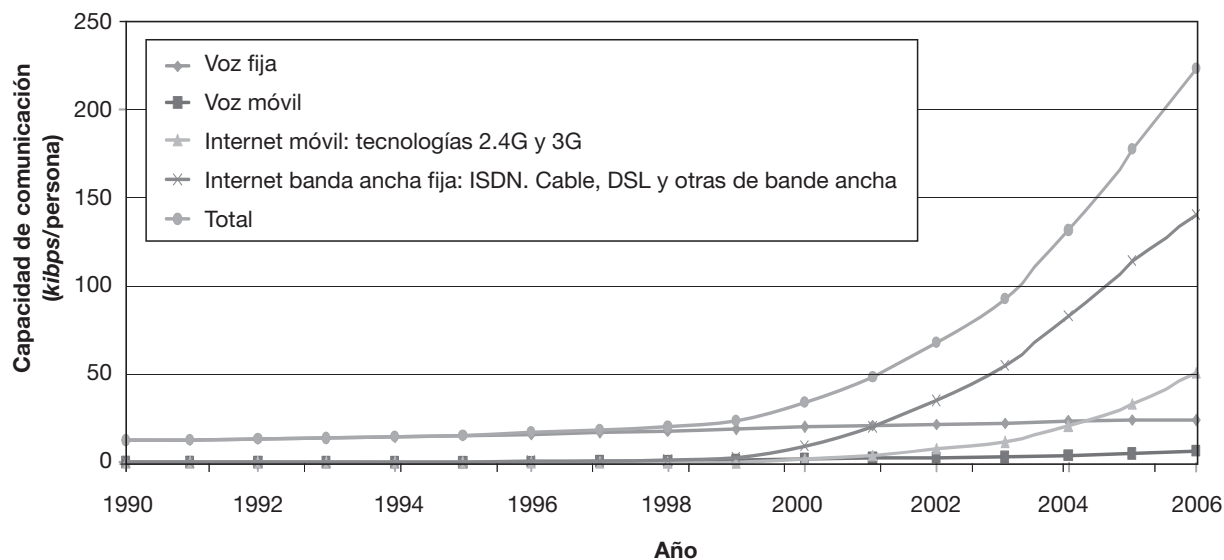
Este escenario cambia a comienzos de los noventa con la aparición de las primeras redes comerciales de servicios de internet (*dial up* e ISDN) y no es hasta 1995 cuando se produce la verdadera explosión, con la masificación mundial de la internet comercial y la introducción de servicios *on-line* como ventas, operaciones bancarias, y otros, gracias a la consolidación de la WWW (*World Wide Web* o red mundial). Al mismo tiempo, se popularizó la segunda generación (2G) de telefonía celular (la primera red GSM fue lanzada en 1991), que permitía la comunicación de voz y datos (servicio de mensajería corta SMS y envío de faxes, principalmente) por medio de redes móviles. El nacimiento de las tecnologías de banda ancha se produce en 1996 con la utilización de la infraestructura de televisión por cable para la transmisión de datos (cable módem) y en 1998 aparece DSL, que mediante la infraestructura de telefonía fija ofrece una velocidad de datos mayor a la de la tecnología de banda angosta *dial up*.

Si se analiza la historia, se puede observar un crecimiento exponencial de la capacidad de comunicación en el mundo. En 1970 la capacidad instalada correspondía a unos 5,72 *kibit/s/persona*, en 1980 a unos 8,89 *kibit/s/persona* y en 1990 la capacidad instalada correspondía a unos 12,43 *kibit/s/persona*. Con la aparición de internet por banda ancha, este crecimiento ha sido explosivo. En 1995 cada habitante contó en promedio con 15,51 *kibit/s/persona*, en 2000 con 34,23 *kibit/s/persona* y en 2006 con 223,75 *kibit/s/persona*. En otras palabras, entre 1996 y 2006 la capacidad de intercambiar información se multiplicó por el factor 13. Tal como muestra el gráfico, que incluye la capacidad de intercambiar datos a través de internet y de la telefonía móvil, en 2006 DSL representó el 61 por ciento de este potencial total, mientras la telefonía móvil abarcó un 27 por ciento e ISDN solamente el 0,8 por ciento. En 1998, ISDN todavía representaba un 48 por ciento de la capacidad instalada por persona a nivel mundial; mientras que DSL no contribuyó ni con un 4 por ciento. También se puede

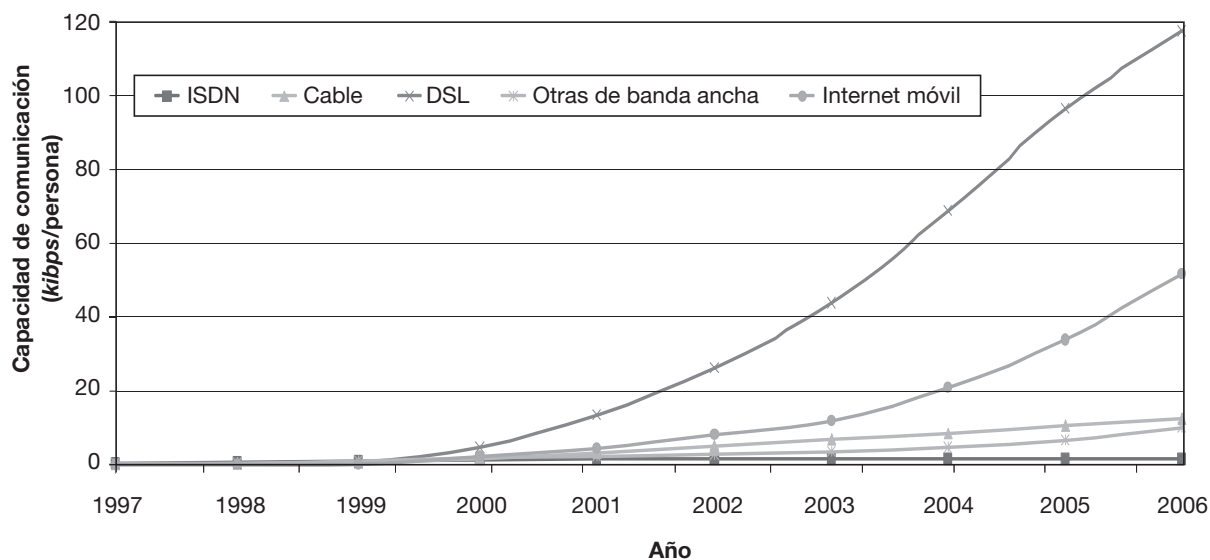
Gráfico 5.2

CAPACIDAD DE INTERCAMBIAR INFORMACIÓN POR MEDIO DE LAS TELECOMUNICACIONES, POR PERSONA EN VOZ Y DATOS ENTRE 1990-2006, Y SOLAMENTE DATOS ENTRE 1997-2006

a. Capacidad para el intercambio de voz y datos, 1990-2006



b. Capacidad para el intercambio de datos, 1997-2006



Fuente: elaboración propia (véase el anexo de notas metodológicas).

observar que la capacidad conjunta para la transmisión de voz y datos a través de las tecnologías móviles superan a las de las líneas fijas en 2004, dada la introducción de servicios de datos móviles avanzados con las tecnologías 2.5G EDGE y CDMA2000.

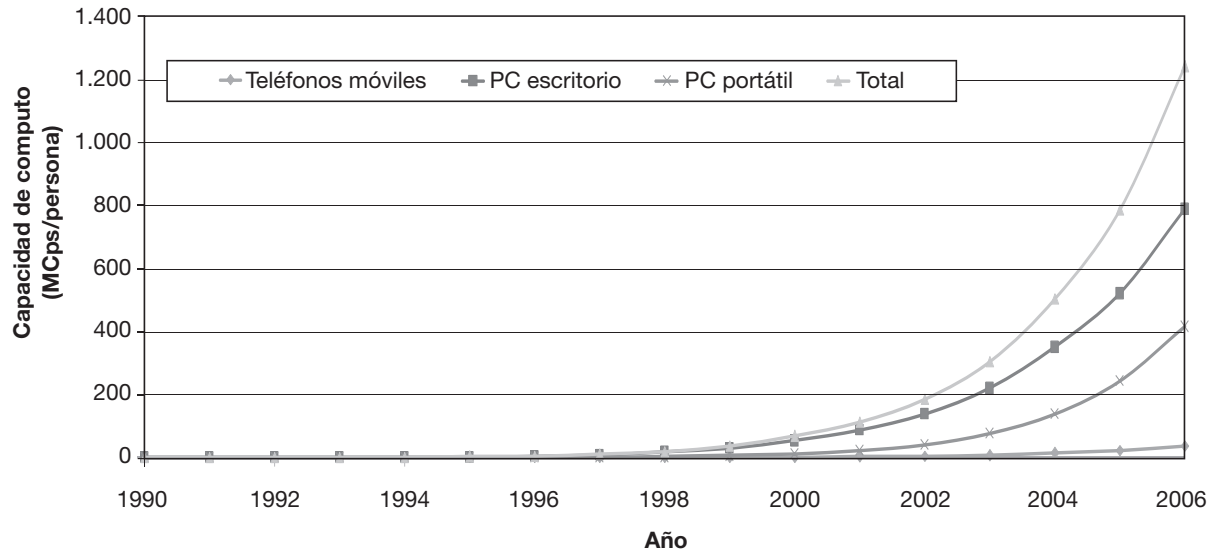
El hecho que DSL se haya convertido en la tecnología de acceso a internet más popular a nivel mundial, se puede explicar por el gran número de proveedores del servicio que la utilizan (su instalación no requiere de una gran inversión ya que se reutiliza infraestructura existente), su extensa cobertura (quien tenga servicio telefónico podría suscribirse) y los costos relativamente bajos con que es ofrecida en el mercado. Con respecto al aporte de las tecnologías móviles a este total, es necesario tener en cuenta que no se debe a que su velocidad de transmisión sea mayor que la de *dial up* o ISDN –en efecto, no es hasta la instalación de las tecnologías 2.5G cuando se comienza a producir la relación anterior– sino que se debe al número de abonados móviles, que ya en 2004 representaba 4 veces y media el número de suscriptores a internet. Con la situación explicada anteriormente incluso se podría reforzar esta tendencia debido a la evolución de las tecnologías de acceso a internet que han impulsado las tecnologías móviles de celulares de tercera generación (3G). Por otro lado, no se puede dejar de mencionar a las tecnologías de acceso por cable, que con la transición del uso del par trenzado (cobre) o cable coaxial a la fibra óptica como medio físico permiten velocidades de transmisión de datos del orden de los Gbps en tecnologías como Ethernet (GbE, 10 GbE, 100 GbE, etc.), o las redes PON,⁸ entre otras. Por su parte, los nuevos estándares de las tecnologías xDSL (ADSL2+, ADSL2, VDSL2, etc.) también han aumentado sus tasas de transmisión con el aumento del espectro disponible y el uso de nuevas técnicas de modulación, pero sin lograr superar la barrera de los 250 Mbps.

b. Capacidad de computación en el mundo

La famosa “Ley de Moore” y la masificación de computadoras para el uso personal han contribuido al aumento doblemente exponencial del crecimiento de la capacidad de computación en el mundo. Se utilizan las estimaciones de un extenso estudio de Nordhaus (2006) que establece una unidad común denominada CPS (cómputos por segundo), la cual permite armonizar el desempeño de las computadoras. Según este indicador, en 1990 ya eran unos 0,13 millones de cómputos/s/persona; cinco años más tarde eran unos 2,60 millones de cómputos/s/persona; en 2000 eran unos 68,12 millones y en 2006 había unos 1.241,43 millones de cómputos/s/persona disponibles en el mundo.

Se puede notar que, a pesar de la gran masificación de los equipos móviles, la capacidad de cómputo de los celulares está muy por debajo de la capacidad de procesamiento de las computadoras (de escritorio y portátiles), representando sólo el 3%

⁸ Las PON son redes ópticas en las que no se utilizan elementos de red activos en la transmisión, es decir, no se usan elementos que consuman potencia.

Gráfico 5.3**CAPACIDAD DE PROCESAR INFORMACIÓN POR MEDIO DE COMPUTADORAS Y CELULARES 1990-2006****Comparación de cómputos realizados**

Fuente: elaboración propia (véase el anexo de notas metodológicas).

de la capacidad total en 2006. Esto está dado principalmente por el hecho que alrededor del 90 por ciento de los suscriptores a telefonía móvil utilizan dispositivos 2G/-2.5G, cuyos procesadores o DSPs (*Digital Signal Processor*) tienen comparativamente un poder de cómputo bastante menor que el de las computadoras. Por otro lado, aunque los equipos 3G triplican la capacidad de computación de los celulares 2.5G, se estima que sólo llegan a representar el 4,5% del poder de una computadora en 2006. De todas maneras, se espera que con la masificación de las tecnologías móviles de tercera generación, los equipos celulares tengan un rol más importante en la capacidad total de procesamiento en el corto plazo.

c. Capacidad de almacenamiento de información en el mundo

Como la mayor parte de la información digital está guardada en los discos duros de computadoras de escritorio o portátiles, no debe sorprender que el potencial de almacenar información en formato digital aumente con la masificación de estos dispositivos. El gráfico 5.4 muestra que en 1990 la capacidad tecnológica instalada en el mundo correspondía a 9.947 kb/persona, que es suficiente para guardar una foto digital de baja resolución y un documento de texto breve. Diez años más tarde había nueve veces más capacidad instalada, y en 2006 existía la capacidad para almacenar en discos duros alrededor de 340.241.086 kb/persona.

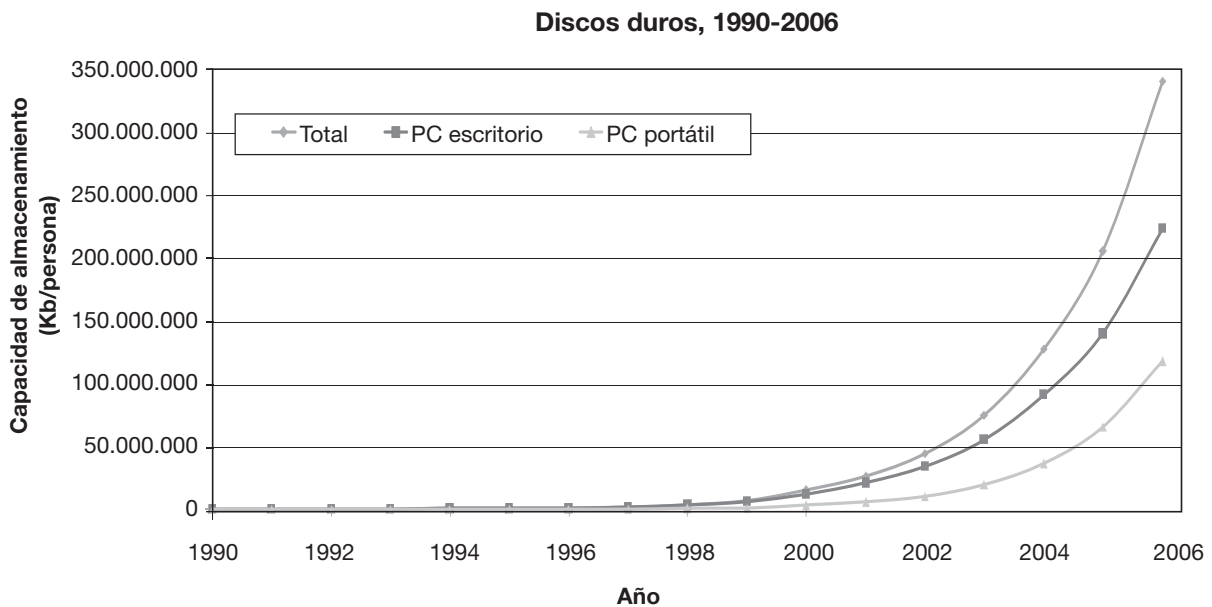
d. Conclusiones sobre la capacidad de capturar e interoperar información

En el cuadro se muestra un resumen del crecimiento en las funciones informáticas básicas. Como se había mencionado en el capítulo anterior, el punto de vista más común es que el paradigma digital contribuyó a una sobrecarga del intercambio de información, mientras que la capacidad de procesamiento no mantuvo el mismo ritmo. Sin embargo, en el cuadro se demuestra que la capacidad de procesar y almacenar información aumentó mucho más que la capacidad de difusión. Esto no es necesariamente una contradicción si se considera que el procesamiento mediante fuerza bruta no representa automáticamente la extracción de significado y conocimiento (véase el capítulo La información, el conocimiento y las TIC). Cabe recordar que en el marco conceptual de las funciones básicas de la información que se presenta en este libro, también se considera la mente humana como parte de este proceso. Desde este punto de vista, y según la teoría de la sobrecarga de información, pareciera ser que la capacidad de la mente humana fue sobrecargada con el incremento en el intercambio de información, especialmente por las 19 veces que se multiplicó la capacidad de comunicación durante 16 años desde 1990 hasta 2006. El desafío ahora consiste en explotar la fuerza computacional disponible para extraer conocimiento del océano de datos.

Por otro lado, el cuadro muestra que, por ejemplo, si los canales de comunicación operaran a máxima capacidad y la información transmitida fuera original y almace-

Gráfico 5.4

CAPACIDAD PARA ALMACENAR INFORMACIÓN 1990-2006



Fuente: elaboración propia (véase el anexo de notas metodológicas).

nada tan pronto como fuera recibida, entonces cada usuario podría llenar la capacidad de almacenamiento disponible per cápita en aproximadamente dos semanas, en 2006.⁹ Mientras que en 1990, y bajo los mismos supuestos, la capacidad de almacenamiento disponible podría ser completada en menos de una hora y media.¹⁰ Esto sugiere que la capacidad estimada para el almacenamiento de información se ha incrementado de una manera mucho más notable que la capacidad para comunicar, por lo cual sería el rasgo de la Sociedad de la Información con carácter más dinámico. Esto es especialmente interesante si se considera que las tecnologías para el almacenamiento son las menos tomadas en cuenta en la mayoría de la literatura existente sobre la Sociedad de la Información, la cual se centra principalmente en la difusión de las telecomunicaciones.

Cuadro 5.1

RESUMEN DE CRECIMIENTO EN LAS CAPACIDADES INSTALADAS DE INTEROPERAR INFORMACIÓN EN LAS TIC A NIVEL MUNDIAL

Función básica	1980	1990	2000	2006	Factor de multiplicación 1990-2006
Comunicación (telefonía e internet) <i>kibps/persona</i>	9	12	34	224	19
Transmisión (radio y TV) <i>kibps/persona</i>	2.653	4.403	7.230	8.143	2
Procesamiento (computadoras y dispositivos móviles) <i>MCps/persona</i>	0,0026	0,13	68	1.241	9.546
Almacenamiento (discos duros) <i>kbits/persona</i>	9.475	56.438	14.501.988	299.951.493	5.409

Fuente: elaboración propia (véase el anexo de notas metodológicas).

⁹ (299.951.493 *kbits/persona* almacenamiento) dividido por (224 *kibits/s/persona* comunicación) = 1.339.069 segundos, que corresponden a 15,5 días.

¹⁰ (56.438 *kbits/persona* almacenamiento) dividido por (12 *kibit/s/persona* comunicación) = 4.703 segundos, que corresponden a 1,31 horas.

6. EVOLUCIÓN EN LA TRANSMISIÓN¹¹

Desde los albores de la humanidad se han utilizado diferentes soluciones tecnológicas para transmitir información. Existe una gran variedad de opciones para clasificar estas soluciones, como por ejemplo sus características de transmisión (aire o tierra); sus medios de transmisión (el correo, el cable de cobre, el cable coaxial o la fibra óptica); sus requerimientos tecnológicos (la radioteledifusión o las telecomunicaciones), entre otras alternativas. Después de varios intentos, se ha optado por un ordenamiento desde el punto de vista de la codificación de los mensajes, que resultó como el aspecto de clasificación más universal y con mayor poder explicativo. Se ha hecho un ordenamiento cronológico y se ha tomado en consideración el período de cada paradigma; en cada uno de ellos se señala algún mecanismo preponderante utilizado para transmitir información entre un emisor y un receptor.

Después de analizar unas 106 innovaciones importantes, se pueden identificar cuatro paradigmas:

1. *Código directo*: desde a. C. -1793, un período de miles de años.
2. *Código multisimbólico*: 1793-1875, un período de 82 años.
3. *Código continuo*: 1875-1948, un período de 73 años.
4. *Código binario*: 1948- hoy, un período de más de 59 años.

Para poder medir el progreso tecnológico de las diferentes soluciones en esta trayectoria se consideran principalmente la velocidad de transmisión, medida en *bits* por segundo (bps) o *kilobits* por segundo (kbps), que corresponden a la cantidad de información transmitida por un determinado medio por unidad de tiempo, y al costo en la transmisión de información. Esto resulta en el indicador de desempeño “*bits* por segundo por unidad de dólar” (bps/dólar) o “*megabits* por segundo por unidad de dólar” (Mbps/dólar). Al considerar el efecto económico sobre la evolución de las tecnologías se utilizó como moneda constante el dólar en su valor de diciembre de 2006, y para el cálculo sobre los años previos se tomó el valor relativo modificado por la tasa de

¹¹ Este capítulo fue elaborado por Miguel González A. de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile y Martin Hilbert, de la Cepal. Se agradecen especialmente las contribuciones y comentarios indispensables de Christian Nicolai.

inflación en Estados Unidos. Para extraer estos valores se analizaron distintos servicios y medios de transmisión, desde información referida a varios siglos atrás, hasta los medios más sofisticados de comunicaciones inalámbricas y por fibra óptica que predominan en la actualidad en el modo de transmitir información en las redes de telecomunicaciones.

a. Paradigmas de transmisión de información

A lo largo de la historia podemos distinguir etapas que difieren en algunas características fundamentales en la manera en que se realizó la transmisión de información. En general, se observa en los gráficos un crecimiento exponencial tanto de la velocidad de transmisión (representado por 119 innovaciones importantes) como del costo-desempeño (representado por 91 innovaciones importantes). Se nota que el crecimiento rectilíneo en el gráfico logarítmico se traduce en un crecimiento exponencial en un gráfico lineal. Tal como lo enseña la teoría del progreso técnico, como momento de inicio y de término de un paradigma se consideró la aparición de alguna innovación de sistema que cambió la manera de codificar los mensajes transmitidos. En este sentido, el factor importante a considerar es la forma en que se codifica el mensaje, que es en el fondo el formato de la información que efectivamente recorre todo el proceso de transmisión del emisor al receptor.

Para el caso de tecnologías predigitales de mayor antigüedad, se realizaron simulaciones en términos de la entropía de la información a transmitir.¹² Se utilizaron los valores descritos por Vail, Nyquist y Shannon [1] en términos de número de *bits* por palabra y de esa forma se pudo llegar a un valor final para la estimación del número de *bits* presente en un mensaje enviado. Por ejemplo, para el servicio de teléfono dicha tasa de transmisión tomaría un valor de alrededor de 8 *kbits* por segundo (válido para el idioma inglés),¹³ mientras que para el caso digital esta cifra llega a los 64 kbps.¹⁴ Por

¹² La entropía de la información para un determinado código se define como:

$$I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i,$$

donde p_i es la probabilidad de aparición de un determinado símbolo en toda la variedad de palabras que componen la codificación analizada. Por ejemplo, de acuerdo con estudios realizados por Vail y luego por Nyquist, la entropía del idioma inglés es de alrededor de 9,14 *bits* por palabra.

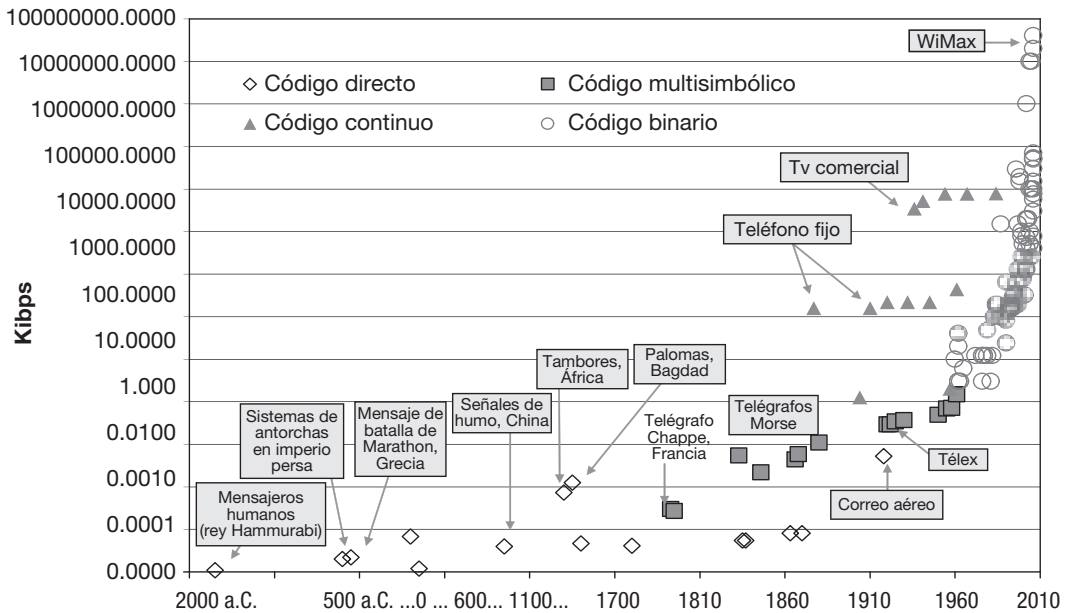
¹³ Aquí se presumen como ciertas las cantidades mencionadas tanto en [1] como en [2], acerca de la cantidad de letras que pueden ser utilizadas por una persona durante una conversación y que sean identificables a nivel auditivo.

¹⁴ Este valor corresponde a la tasa de transmisión alcanzada por la digitalización de la telefonía en Estados Unidos por PCM de 256 niveles (modulación de código por pulsos). Mediante esta modulación, se envía el ancho de banda de 8 kHz (ya que según Nyquist, para observar un cierto rango de frecuencias, es necesario muestrear a lo menos con el doble de la máxima frecuencia que se desea transmitir). Así tendremos: 8.000 muestras/seg * 8 *bits*/muestra = 64 kbps. Aunque en la norma T1, el octavo *bit* es usado para señalización. Por ello los módems convencionales con norma V.90 transmiten a la conocida tasa de 56 kbps.

otra parte, para las tecnologías digitales simplemente se usan los valores de velocidad de transmisión conocidos cuando dichas innovaciones aparecen en los mercados de consumo. Los paradigmas observados se detallan en los gráficos 6.1 y 6.2.

Gráfico 6.1

VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN EN KBPS 2000 A.C. -2000 D.C.



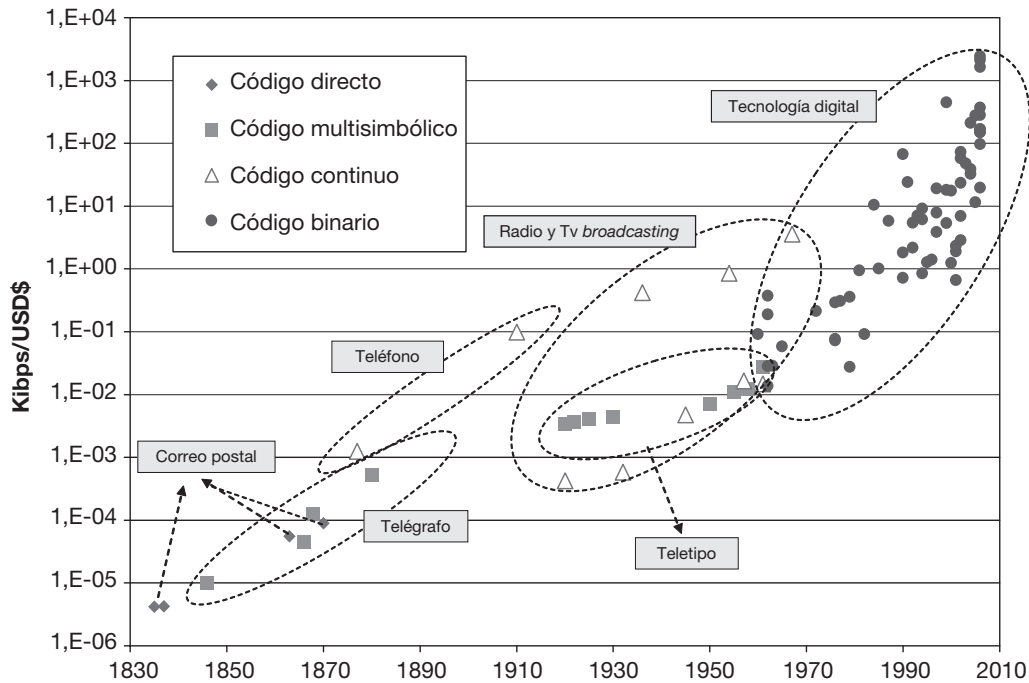
Fuente: elaboración propia.

Nota: medición de 119 innovaciones importantes.

1. Paradigma de transmisión de codificación directa

Desde que se comenzó a utilizar la escritura, el método más frecuente de comunicación entre dos seres humanos que se encontraban a mediana o larga distancia correspondía al envío de la información por un medio de almacenamiento físico, que permitiera el traslado de lo que se deseaba comunicar sin que existieran alteraciones. Por eso el nombre de “código directo”: el contenido simbólico permanece constante a lo largo de todo el proceso de comunicación sin que se lo transforme en un código específico para una transmisión más efectiva. Esto también significa que el mismo ser humano puede desempeñar la función del medio de transmisión. Un ejemplo es el del famoso Fidípides, quien en el año 490 a. C. recorrió unos 42 kilómetros desde Maratón a Atenas para anunciar la victoria de la batalla de Maratón, antes de caer muerto debido al cansancio de la carrera y del combate anterior. Suponiendo una duración del viaje de tres horas para la transmisión de este mensaje (14 km/h) y presumiendo

Gráfico 6.2



Fuente: elaboración propia.

Nota: medición de 119 innovaciones importantes.

que el mensaje transmitido podría ser resumido en 200 palabras, igual a media página de este libro, se puede estimar que este logro histórico correspondía a una tasa de transmisión de unos 0,17 *bits* por segundo.¹⁵ Cabe suponer que los mensajeros del Imperio Romano que recorrían distancias mucho más largas solían lograr una tasa de transmisión un poco más baja.

La existencia de mensajeros humanos que establecían comunicaciones de este tipo en la Edad Antigua se remonta a la época de los sumerios con el uso de aves para el envío de mensajes escritos en papiros. Numerosas referencias apuntan a mecanismos de entrega de mensajes en la época de los faraones en Egipto, del rey Hammurabi en Babilonia (Mesopotamia), de los primeros emperadores chinos y también durante el Imperio Romano (Holzmann y Pehrson, 2001). Había un sinnúmero de maneras de implementación con diferentes fines y requerimientos de transmisión, como por ejemplo mensajeros humanos que transportaban un ave que era liberada para entregar el mensaje en caso de que el portador original de la información fuese atacado. Estas prácticas podrían remontarse al año 2000 a. C., cuando había redes de

¹⁵ Si se aplica la estimación de Shannon de 9,14 *bits* por palabra en inglés, el resultado es de 200 palabras * 9,14 *bits*/palabra dividido por 10.800 segundos.

mensajeros que sólo cumplían servicios para la nobleza o el ejército, las cuales denotan que la necesidad de comunicarse a distancia ya existía. Un sistema interesante de mensajería entre humanos es el que se utilizó en el período de la conquista romana de la Galia (mediados de 100 a. C.). Los ejércitos y vigilantes de Julio César se comunicaban por medio de gritos que llegaban a distancias de cientos de kilómetros mediante el uso de numerosos locutores. Este bien podría ser considerado el primer sistema inalámbrico de comunicaciones de voz en la historia. Los registros relacionados con este paradigma continúan en la Edad Antigua y también en la Edad Media, en las cuales existían mecanismos de mensajeros que, en los ejércitos de numerosos pueblos comunicaban entre las distintas legiones o grupos de soldados las órdenes proferidas por el mando principal. Casos representativos de ello resultan ser el sistema de *chasquis*¹⁶ en el Imperio Inca, y los jinetes usados por Gengis Khan en la Edad Media para obtener noticias del otro extremo del continente asiático mientras él batallaba en el Oriente Medio. El uso de mensajeros también tenía una utilidad comercial, como el caso de los sistemas utilizados por Marco Polo a finales del siglo XIII. Se mantuvo vigente el uso de aves mensajeras, además de carruajes y mensajeros a caballo, categoría donde encaja el famoso Pony Express norteamericano.

Cabe destacar que es difícil estimar el costo de la transmisión durante el paradigma de código directo. Parece indiscutible que los servicios eran demasiado caros para el ciudadano común de la época y que la transmisión se realizaba casi exclusivamente para información de tipo gubernamental y militar. Otra problemática era la disponibilidad de los servicios. Si bien con estas soluciones se podían trasladar grandes cantidades de información, el alto costo no permitió que el proceso de transmisión se realizara siempre en el instante en que el verdadero emisor lo deseaba, sino sólo durante la escala de un convoy o jinete. Se deben recordar las mejoras que se hicieron al servicio de correos con la invención del ferrocarril, cuya aparición comercial en 1829¹⁷ incrementó a alrededor de los 50 km/h la velocidad media, la cual anteriormente apenas alcanzaba los 10 km/h. La exadaptación de los resultados de innovaciones en el transporte durante el paradigma de las máquinas a vapor y de la motorización contribuyó al progreso en los sistemas de transmisión de información. En cuanto a esta forma de comunicarse a distancia, podemos decir que aún se sigue utilizando, especialmente en casos en los que se exige que la información sea de primera mano por razones de privacidad o autenticidad, es decir, los medios de transmisión directa no han desaparecido.

¹⁶ El sistema de *chasquis* correspondía a un grupo de hombres que a pie recorría las extensiones del Imperio Inca a través del camino del mismo nombre, ruta que abarcaba desde lo que hoy corresponde a Ecuador hasta la zona central de lo que actualmente es Chile. Este mecanismo de correo funcionó hasta mediados del siglo XVI, cuando acontece la conquista de América por parte de los españoles.

¹⁷ En esta fecha comienza a ser usado el ferrocarril para transporte de pasajeros y de correo en algunas localidades de Inglaterra. Hasta aquel entonces sólo era utilizado para transportar carbón.

2. Paradigma de código multisimbólico

En 1793 se produce una innovación de sistema que cambió sustancialmente el concepto de comunicación. La idea básica consistía en transformar la información en un código especial para su transmisión más efectiva; el receptor podría retransformar los símbolos recibidos y adaptarlos al formato deseado. Los métodos anteriores a este paradigma eran las señales de humo o señales de luz por espejos utilizados desde la antigüedad, pero que nunca fueron muy elaborados. Por eso sólo se utilizaron para mandar mensajes de una tasa de transmisión muy baja, como por ejemplo “peligro” o “fuera de peligro”.

El francés Claude Chappe aplicó este concepto para crear el primer telégrafo de la historia. El telégrafo o semáforo Chappe (como se le llamaba en aquel entonces) consistía de una barra horizontal denominada “regulador” y dos alas más pequeñas o “indicadores”, montadas en los extremos del regulador, de forma que al activarse todo el sistema mecánicamente se imitaba a mayor escala el movimiento de una persona haciendo señas con sus brazos. Por primera vez se utilizaba un sistema de diferentes símbolos por palabra para la codificación. De esta manera nació un nuevo esquema de transmitir la información a través de un código de múltiples símbolos, como por ejemplo con el movimiento de brazos mecánicos o con luces en torres, que eran las encargadas del envío del mensaje a la torre más cercana. En el tema de la codificación de información, por primera vez se hacía de uso generalizado el manejo de símbolos organizados, que permitían representar los caracteres alfanuméricos occidentales para modificar la forma del mensaje (no así su significado) y facilitar el proceso de transmisión.

Respecto al medio físico, la distancia entre dos torres no superaba los 20 kilómetros, la cantidad de palabras a enviar por unidad de tiempo era bastante limitada (alcanzando tasas no superiores a las dos palabras por minuto) y el servicio no se encontraba disponible durante casi la mitad del día. Sin embargo, claramente representaba una mejora porque a diferencia de las señales de humo, antorchas o espejos, la codificación alfanumérica era la innovación de sistema crucial que permitía enviar cualquier palabra. En un comienzo, el servicio era utilizado exclusivamente para mensajes relacionados con el servicio público, pero como la estructura de costo de estas soluciones consistía en gran parte del gasto fijo para instalar las redes, era provechoso crear economías de escala que redujeran el costo medio de un mensaje. Ya en 1810 se observaban los primeros servicios de telecomunicación privada en Francia e Inglaterra (*tele* significa “distancia” en griego). En esa época también se observa la invención del telégrafo Edelcrantz en Suecia y el semáforo Pasley, que siguen tanto la idea de la telegrafía mecánica como la de codificación de caracteres. Todas las innovaciones en transmisión hasta 1840 consistían generalmente de sistemas de banderas, semáforos o telégrafos mecánico-ópticos.

En 1844 se observaría un cambio estructural que era el fruto de cerca de una década de investigación y numerosos ensayos fallidos. Al telégrafo electromecánico se le incorporó la electricidad para transmitir información, y los primeros registros corresponden a los de la época cuando se instalaron las compañías telegráficas en la costa

este de Estados Unidos. Se estableció un nuevo tipo de codificación¹⁸ (código Morse principalmente, aunque también se aplicaron los códigos House y Vail), permitiendo que la información circulara por un circuito eléctrico de corriente continua formado por un interruptor que abría o cerraba dicho circuito –actuando como emisor– y un electroimán que hacía de receptor.

En las siguientes décadas la evolución positiva del costo-desempeño pasó tanto por su velocidad de transmisión como por sus costos. La velocidad de transmisión aumentó de unas 15 palabras por minuto a alrededor de 90 y 100, dependiendo del tipo de dispositivo y de si se aplicaban productos químicos especiales que permitían una mayor efectividad.¹⁹ Con el paso de los años mejoró la estructura de costos en la implementación de redes telegráficas y también se observó una mejora en términos de controlabilidad con la aparición de codificaciones de tasas constantes de *bits* por símbolo (por ejemplo, el código Baudot de 5 *bits*). En ese sentido, el uso del código Morse significaba una mayor dificultad de lectura automática y detección de errores, problemas que se hicieron menos presentes una vez que surgieron estándares de transmisión, dentro de los cuales se especifica el uso de *bits* de comienzo y fin de mensaje, junto con los *bits* por símbolo constantes. De esa forma se permitía organizar los procesos, ya que así tanto el emisor como el receptor poseerían el conocimiento de los mecanismos de operación y cómo se codifican los mensajes de principio a fin. Estas correspondieron a las primeras normalizaciones para el envío de mensajes en el área de las telecomunicaciones y con ello la creación del organismo multilateral más antiguo del sistema de las Naciones Unidas, la Unión Telegráfica Internacional, que hoy día es la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT).²⁰

¹⁸ Estas codificaciones consistían en simbolizar las letras del abecedario y los dígitos del 0 al 9 por medio de pulsaciones largas o cortas. El número de *bits* (o pulsaciones) por símbolo para los tres tipos de códigos señalados no era constante.

¹⁹ Al hablar de distintos dispositivos, nos referimos a la diferencia en los mecanismos de creación de registros de mensajes, formas de electroimanes usados y grosor de alambres (diferencias que eran suficientes para que un telégrafo tuviese un nombre distinto a otro). Respecto a los químicos, éstos permitían mayor fluidez en el movimiento de las partes mecánicas, dándoles mayor velocidad, o en el caso de los circuitos receptores entregando mayor conductividad, menores pérdidas y mayor tasa de recepción.

²⁰ Antes de esto, cada enlace exigía numerosos acuerdos. En el caso de Prusia, por ejemplo, se necesitaron nada menos que 15 acuerdos para conectar la capital con las localidades fronterizas de otros estados alemanes. Para simplificar las cosas, los países comenzaron a establecer acuerdos bilaterales o regionales, de manera que en 1864 ya había varios convenios regionales en vigencia. La rápida y continua expansión de las redes telegráficas en un número cada vez mayor de países motivó finalmente a las autoridades de 20 Estados europeos a reunirse para constituir un acuerdo marco de interconexión internacional. En esa misma ocasión, en el grupo se acordaron unas normas comunes que se aplicarían a todos los equipos para facilitar la interconexión internacional, se establecieron también normas de explotación que habrían de respetarse en todos los países y se fijaron normas internacionales en materia de tarifas y contabilidad. El 17 de mayo de 1865, tras dos meses y medio de arduas negociaciones, 20 Estados miembros firmaban en París el primer convenio telegráfico internacional con el fin de facilitar posibles modificaciones posteriores a este acuerdo inicial.

A comienzos del siglo XX surge otra innovación dentro de las comunicaciones punto a punto con el teletipo, artefacto considerado como el sucesor del telégrafo y que efectivamente pasó a reemplazarlo en los servicios de telegrafía con la aparición en 1920 de la red Telex creada por la empresa AT&T. Este dispositivo gozaba de una configuración similar a la del telégrafo, con un circuito de corriente continua que al abrirse o cerrarse indica los unos y los ceros que permiten la transmisión de información. La ventaja respecto al telégrafo clásico pasaba por la impresión de los mensajes en cintas o papeles perforados, además de un teclado para su escritura, lo que representaba interfaces más amigables para el usuario y mejoraba la legibilidad del servicio.

Es notable que esta innovación se superponga con el paradigma siguiente. La innovación en las interfaces contribuyó al desempeño de los teleservicios de datos de tal manera que el rendimiento continuó mejorando sin contar con una innovación de sistema propia. En una experiencia similar al aporte del ferrocarril en el servicio de correo durante el paradigma anterior, una vez más una tecnología ajena al propio sistema impulsó el cumplimiento de la promesa de transmitir información más rápidamente. Como se muestra en el gráfico, el efecto en ambos casos es el mismo: el paradigma anterior queda vigente mientras el nuevo paradigma ya está empezando a desplegar su fuerza.

3. Paradigma de código continuo

Después de haber conseguido la transmisión de caracteres escritos legibles entre un punto y otro, el desafío consistió en hacer más complejo el contenido semántico del mensaje y, por ende, su valor cognitivo, como por ejemplo con la reproducción de información en el plano verbal y auditivo. El concepto de dicho invento se enmarcaba en el cambio de señales sonoras a eléctricas mediante la captación del sonido por un auricular, el cual enviaba dichas ondas a una cavidad o diafragma, y luego mediante su vibración mecánica producía las variaciones de frecuencia y amplitud de la onda eléctrica que en definitiva viajaba a través de la red telefónica. Así se consiguió efectuar la primera conversación en 1875 en Estados Unidos (aunque existe controversia hasta el día de hoy sobre las tres personas que podrían haber inventado el teléfono: Graham Bell, Elisha Gray y Antonio Meucci). Aunque la manera de implementación cambió, también en este paradigma continuó la dualidad de medios de transmisión que posibilitan la comunicación tanto alámbrica como inalámbricamente. Mientras las palomas mensajeras y las luces de semáforos fueron las soluciones inalámbricas en los paradigmas anteriores, en el paradigma de código continuo se utilizaron dispositivos electromagnéticos.

Durante la primera mitad del siglo XX, el servicio telefónico no atravesó mejoras importantes en términos de velocidad, pero sí en términos de su modulación, eficiencia espectral y, en especial, de sus costos. Las primeras mejoras se produjeron con el uso de una batería común en los dispositivos conectados a la red y al implementarse la señalización (inicialmente para establecer la conexión de un teléfono con otro se necesitaba instalar un cable exclusivamente para ligar ambos extremos mediante un sistema de bucle creado en 1881). También hubo mejoras cuando disminuyeron las

interferencias que ocurrían en un determinado circuito al ocupar otro circuito conectado. El ancho de banda requerido para efectos de transmisión de voz no resulta ser muy alto, dado que la voz humana provee un rango de frecuencias que llegan hasta alrededor de los 4 kHz, pero una inteligibilidad razonable de la misma ya es obtenible con unos 3 kHz. Esos valores fueron tempranamente conocidos por los primeros proveedores de redes telefónicas, y fue así como se mejoró, pasando de canales que abarcaban casi todo el espectro de frecuencias a anchos de banda que no superaban los 3.5 kHz en 1940. Esto corresponde a una ganancia de la eficiencia espectral de alrededor de 10 órdenes de magnitud en sólo 60 años.

Al contrario de lo que ocurre con la comunicación alámbrica punto a punto del teléfono, se observa a partir de 1895 el desarrollo de la comunicación inalámbrica, mediante un proceso de transmisión punto-multipunto que comúnmente es conocido como *broadcast*, o radioteledifusión. Este concepto nace gracias a la iniciativa del italiano Guglielmo Marconi, quien realizó la primera transmisión radial en Europa. La base científica la dieron los trabajos de James Clerk Maxwell en el campo del electromagnetismo y Heinrich Rudolf Hertz en la creación artificial de ondas radiales. En el ámbito de la radiodifusión, el crecimiento se traduce en la primera transmisión radial en Estados Unidos en 1906 y la masificación de la amplitud modulada (AM) como el estándar de *broadcasting* más utilizado (tanto a nivel comercial como en la aviación y el ámbito militar). En 1935 se publicó el primer estudio en el que se describía la modulación de frecuencia (FM), tipo de modulación que pasaría a ser la preponderante en la difusión de radio de tipo comercial. Pero el uso de frecuencias radiales no se limitó a lo anterior. Comienza la transmisión simultánea de imágenes y voz con las primeras emisiones de televisión a finales de los años veinte. Nacen los dos formatos más difundidos de televisión (NTSC en Estados Unidos en 1940 y PAL en Europa en 1963),²¹ luego dando paso a la televisión a color, que si bien correspondió a un gran adelanto de carácter comercial, no lo fue a nivel tecnológico. Los televisores a color ya existían incluso antes que los aparatos que reproducían imágenes en blanco y negro.

El concepto de una “red” de comunicaciones cobra sentido por primera vez en este período, cuando se generaliza la metodología de diseño de un sistema en el cual todos los participantes llegan a estar conectados unos con otros. En un comienzo no fue así, sobre todo en la telegrafía del paradigma anterior, donde los cables unían exclusivamente dos puntos entre sí, como tampoco en los inicios del teléfono, porque no existía la señalización. Esto se reflejaba en un “*backbone* de miles de cables”,²²

²¹ La diferencia principal entre ambos formatos radica en la frecuencia de muestreo, cuya incidencia se observa más directamente en la cantidad de *frames* o cuadros por segundo que se visualizan en la pantalla de televisión. También existen diferencias en las frecuencias portadoras de imagen a color y en el ancho de banda destinado al video.

²² Un *backbone* corresponde a la espina dorsal propiamente tal de una red de telecomunicaciones. Es por este camino por el cual circula la gran parte del tráfico de información existente en dicha red, ya que allí se invirtió más para ampliar la capacidad de transmisión.

problemas que se vieron solucionados en parte con los primeros interruptores mecánicos,²³ manejados por aquellas famosas operadoras que conectaban las terminales para establecer las comunicaciones, especialmente en el caso de la telefonía.

Un factor a tomar en cuenta es que, por primera vez en la historia, la transmisión de información alcanzaba distancias a escala global e incluso espacial gracias a la propagación electromagnética de las señales de televisión y radio. Por otro lado, la conmutación de circuitos en las telecomunicaciones alcanza su apogeo; se establecieron diferentes canales de transmisión mediante un circuito creado entre el emisor y el receptor, y se dio origen así a una interacción exclusiva entre ambos entes del proceso comunicativo. Pero es en ese punto donde radica la debilidad que no permitiría a este paradigma avanzar mucho más. La eficiencia sólo sería claramente mejorada si se lograba que se produjera una serie de comunicaciones simultáneas sobre un mismo canal, lo cual podía conseguirse si se establecía algún mecanismo para intercalar la información a transmitir dentro de espacios de tiempo o de frecuencia, que son los dos espectros en los que se basa el análisis y la operación de las telecomunicaciones. Esta situación sólo sería alcanzable con el inicio del próximo paradigma.

4. Paradigma de código binario

En este paradigma se han vivido los cambios y mejoras más profundas de toda la historia de las comunicaciones. Tal como se puede apreciar en el gráfico 6.3, el paradigma del código multisimbólico multiplicó su desempeño 500 veces desde el telégrafo de Chappe en 1793 hasta el teletype³¹ de la Teletype Corporation en 1961, que corresponde a un período de 168 años. El paradigma del código continuo multiplicó su rendimiento por un factor de 950 desde el teléfono de Graham Bell en 1877 hasta las transmisiones de PAL-TV en 1967, gracias a un proceso de aprendizaje a escala (*learning by scaling* durante un proceso de innovación continua, en el sentido de Sahal, 1978), que corresponde a un período de 90 años. El paradigma del código binario logró multiplicar su desempeño 54.000 veces desde los primeros teléfonos de datos de AT&T comercializados en 1962 hasta el *WiFi-Phone* lanzado en 2006, que representa un período de apenas 44 años. La característica principal de este período es la implementación de diferentes servicios a través de un único medio o canal de transmisión. Si bien inicialmente no era tan obvia esta asociación, los trabajos matemáticos de Shannon (1948) sentaron la base para la inconmensurable eficiencia del código binario, que converge todas las tecnologías de comunicación en una misma red de transmisión.

Las mejoras que se habían logrado con los años en los servicios de teletipo fueron opacadas con la aparición de los *data phones* (teléfonos de datos) a finales de los años cincuenta, precursores del módem que surgió a comienzos de los años sesenta que

²³ Mediante estos dispositivos se encauzaban las conversaciones desde el emisor hasta el receptor. En un comienzo, no existía el marcado automático de números telefónicos, por lo que era la operadora la encargada de señalar una vez que conocía el número con el cual se deseaba entablar la comunicación.

permitieron el envío simultáneo de voz y datos en un mismo canal. Ya en esta época, los servicios que ofrecían las redes telefónicas representaban una competencia más eficaz en comparación con lo que podían implementar las redes de télex. Tanto fue así que a partir de los años setenta la compañía AT&T comenzó a desincentivar el uso de los mensajes telegráficos mediante la aplicación de alzas en las tarifas.²⁴ En 1965 se pone en órbita sobre el océano Atlántico el primer satélite geoestacionario de telecomunicaciones, el Intelsat I. Nacen las redes de comunicación satelital, se globalizan las comunicaciones y se comienzan a transmitir imágenes, voz y datos al mismo tiempo. En las décadas del sesenta y del setenta se produce un “boom” de lanzamientos de satélites de telecomunicaciones al espacio, con lo que se mejora la cobertura y la capacidad, gracias a la amplia utilización del espectro de microondas (de 300 MHz a 300 GHz), especialmente en sus bandas más bajas. Con el surgimiento del módem se produce el importante salto en la utilización de señales, que podían ser analógicas o digitales. El nuevo dispositivo permitía la modulación y desmodulación de señales de los dos tipos mencionados, y se mejoraba así la inmunización al ruido, la velocidad de transmisión y tanto la capacidad como la cantidad de canales. Durante los años setenta no se registraron mayores avances, ya que la demanda estaba más concentrada en torno a los servicios de voz, los cuales no exigían tantas mejoras debido al progreso alcanzado en la década anterior. El progreso en los períodos siguientes pasó por los tipos de codificación y modulación, como PSK (*phase shift keying*) y QAM (*quadrature amplitude modulation*).²⁵

Un hecho a destacar es que la estabilización en parte se debe al proceso de normalización que atravesaron las redes en los años setenta. Es en esta década en la cual aparecen los primeros documentos y RFC (*request for comments*)²⁶ que establecen las bases de los protocolos de capas de red que pasarían a ser los más utilizados en Arpanet y su sucesora NSFNET (TCP/IP, FTP, UDP, SMTP, HTTP, entre muchos otros). La conmutación por circuitos queda obsoleta y se le abre el paso a la conmutación por paquetes.²⁷ Una vez que la industria absorbe este conocimiento, comienza una nueva ola de crecimiento en la velocidad de transmisión provocada, en gran parte, por la aparición de módems más rápidos y la implementación del fax, un dispositivo me-

²⁴ A comienzos de los años noventa fue clausurada la red de télex en Estados Unidos, ya que era alrededor de cinco veces más caro enviar un mensaje telegráfico que realizar una llamada básica desde un teléfono público. Sin embargo, recién a partir de 2005 dejó de ser obligatorio el conocimiento del código Morse para rendir el examen de radioperador.

²⁵ Son, sin duda, TDMA (*time division multiple access*) y FDMA (*frequency division multiple access*) los tipos de modulación que han representado un mayor aporte dentro de las comunicaciones por ondas de radio. De hecho, casi toda la telefonía móvil le debe su existencia y operación a este tipo de transmisión.

²⁶ Los RFC son recibidos, formulados, editados y aprobados desde 1998 por la IETF (Internet Engineering Task Force).

²⁷ En este tipo de conmutación, la información es dividida en paquetes, cada uno de los cuales contiene, a su vez, información sobre el punto de origen y destino.

diante el cual se podía transmitir en un tiempo relativamente corto. La mejora más importante vino de la mano de una innovación de material en los medios alámbricos de transmisión: la aparición de la *fibra óptica*. La velocidad de la luz permitió que por primera vez se hablara de “giga” al referirse a la velocidad de transmisión, mientras el coaxial en su época hizo lo propio con el prefijo “mega”.

Otro suceso de importancia en este paradigma es el de la transformación de internet en una red de utilización pública. Una vez que Arpanet retornó a su utilidad como red militar y quedó NSFNET como la principal red de intercambio de información, comienza un período de masificación a nivel mundial, y este ritmo de crecimiento lleva al surgimiento de internet. En este sentido, el vínculo entre la transmisión y la posibilidad de mayor almacenamiento de información pasa a ser un factor relevante en el mercado. También en esta década se observa la aparición de tecnologías inalámbricas más efectivas, principalmente en lo que se refiere a telefonía, con la implementación internacional de la segunda generación de telefonía móvil,²⁸ de la cual el estándar abierto europeo –GSM– resultó ser el más utilizado y el que facilitó el auge de las comunicaciones móviles. Además, a partir de los años noventa, tanto la televisión como la radio dan el paso a la digitalización mediante diversos dispositivos y señales.

Los datos más representativos de este paradigma se aprecian de mejor forma en el gráfico 6.3, que corresponde a una ampliación del gráfico anterior. Al observar la avenida principal de innovaciones se ve claramente un crecimiento exponencial a pesar de que el eje-Y ya está presentado en formato logarítmico. Esto implica una tasa de cambio exponencial que resulta en el crecimiento explosivo del rendimiento percibido por los usuarios. También es observable el cambio que surge a partir de mediados de los años noventa en la tendencia de aquel entonces, que principalmente era liderada por la evolución del módem y la masificación de la fibra óptica.

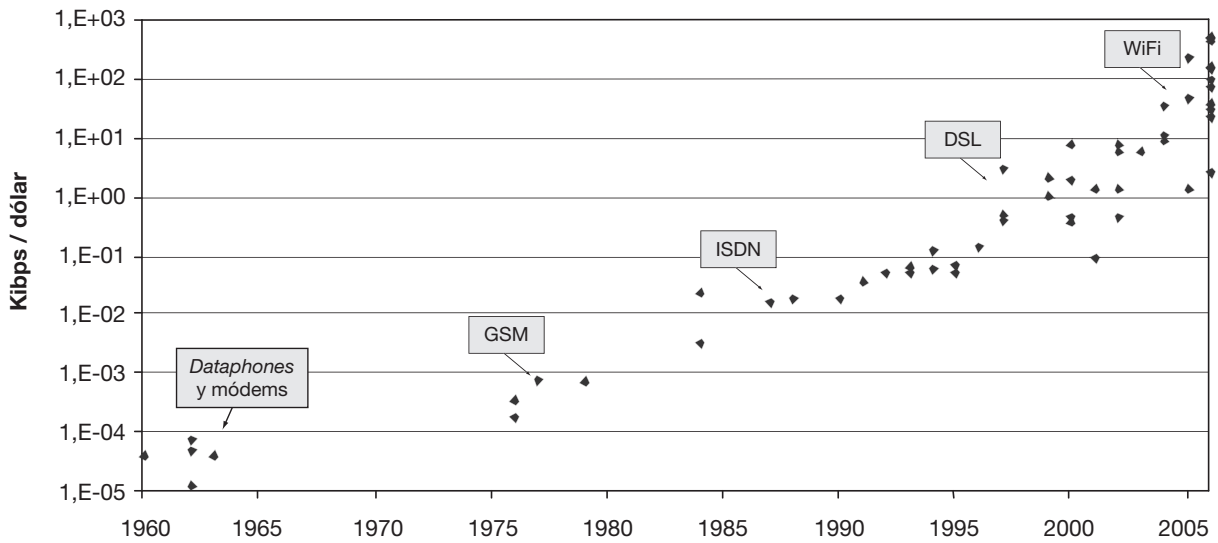
b. Conclusiones

Revisando el progreso técnico al que han dado origen numerosas soluciones de transmisión de información, desde los mensajeros del año 2000 a. C. hasta la banda ancha de fibra óptica, se puede observar como resultado sobresaliente el avance exponencial de estas tecnologías, cuya tasa de crecimiento también posee un incremento exponencial. Si bien la avenida de innovaciones formada durante los siglos pasados muestra un desarrollo similar entre servicios de diferentes materiales, alámbricos e inalámbricos, parece ser la manera de codificar información la que tiene mayor tasa de poder explicativo. A partir de lo observado, tanto en los gráficos como en la historia cronológica, se pueden distinguir cuatro períodos o paradigmas para el análisis de la evolución en la transmisión de información. Durante los paradigmas de la codifi-

²⁸ La segunda generación móvil en telefonía, o 2G, fue la primera en esta área que permitió el envío de voz y texto simultáneamente.

cación multisimbólica y del código continuo existieron varias ramas paralelas dentro de la avenida de innovación general, y se puede observar que el código binario del paradigma digital representa una etapa en la cual las diversas soluciones convergen hacia un formato común.

Gráfico 6.3
DESEMPEÑO / COSTO DE TRANSMISIÓN EN EL PARADIGMA DEL CÓDIGO BINARIO (1960-2006)



Fuente: elaboración propia.

Nota: medición de 67 innovaciones importantes.

7. EVOLUCIÓN EN LA CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO²⁹

Muchos relacionan el análisis de los distintos sistemas computacionales con la famosa “Ley de Moore”. En 1965, el cofundador de Intel, Gordon Moore, planteaba que el número de transistores de un *chip* se duplicaría cada dos años, es decir, sería una avenida de innovación con una trayectoria tecnológica exponencial. La avenida de innovación correspondiente ha recibido mucha atención y es objeto de discusiones intensas (Tuomi, 2002, Schaller, 2004). La gran mayoría de las investigaciones están restringidas a esta conocida avenida de innovación y no se las enmarca en la teoría del cambio tecnológico más amplio, sin ir más allá del paradigma de los microprocesadores. Si se observa la tarea de computar información como la respuesta a una promesa que trasciende la era del silicio, se puede ver que los microprocesadores representan el sexto paradigma tecnológico en una avenida de innovación mucho más larga. Con esto se reconfirma la tesis de Kurzweil (2001), según la cual los avances en lo que atañe al rendimiento de la computación ya son exponenciales hace por lo menos más de cien años. Se ha optado por un ordenamiento de las 241 diferentes soluciones tecnológicas localizadas desde el punto de vista del sistema utilizado para cumplir las computaciones. Este aspecto de clasificación es característico para poder diferenciar los cambios en los paradigmas y tiene el mayor poder explicativo.

Al analizar unas 233 innovaciones importantes, se concluye que han existido seis paradigmas:

1. *Manual*: desde a. C.-1857, un período de miles de años.
2. *Mecánica*: 1857-1933, un período de 76 años.
3. *Electromecánica*: 1933-1946, un período de 13 años.
4. *Tubos de vacío*: 1946-1955, un período de 9 años.
5. *Transistores*: 1955-1973, un período de 18 años.
6. *Microprocesadores*: 1973-hoy, un período de más de 34 años.

²⁹ Este capítulo ha sido elaborado por Cristian Monges O., de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Eléctrica, de la Universidad de Chile.

Es interesante observar que, al contrario de lo ocurrido en los ciclos de innovación de otras tecnologías, los períodos entre los cambios paradigmáticos en la computación no siguen una lógica tradicional con períodos cada vez más cortos. Uno de los paradigmas tecnológicos más prolongados hasta el momento es el paradigma del microprocesador, que ya domina su avenida de innovación hace más de tres décadas; este hecho debe ser una de las razones de su importancia.

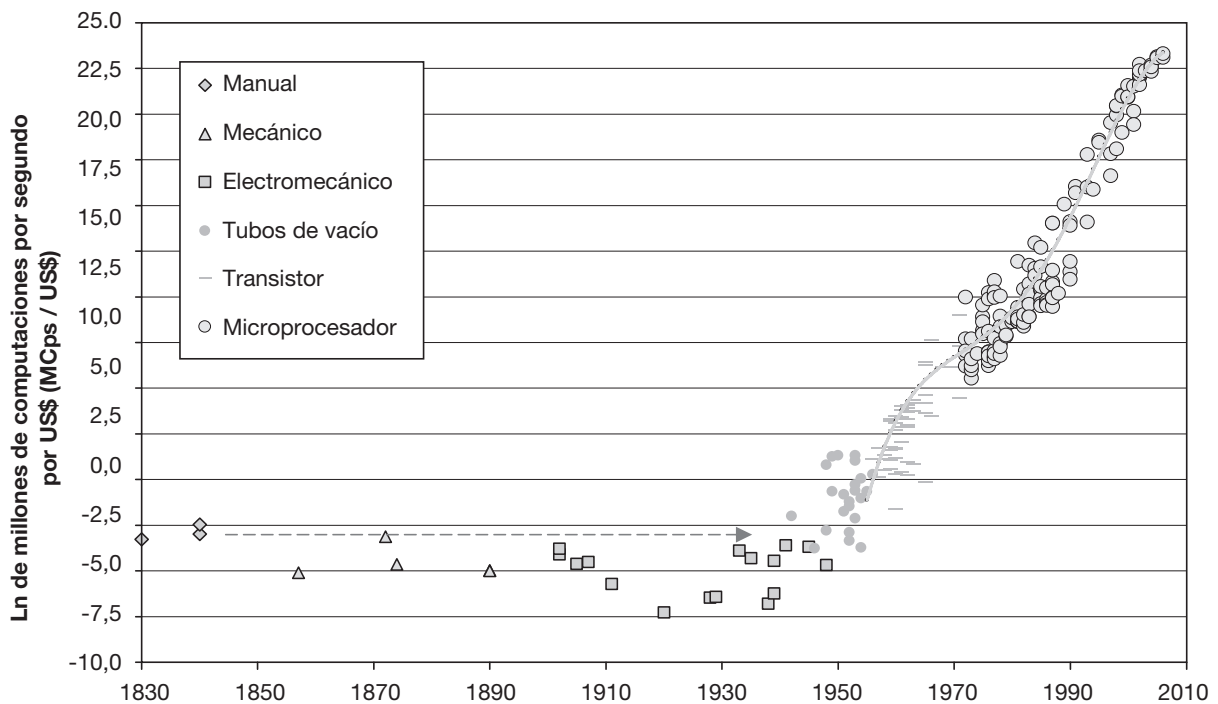
Existen diferentes indicadores para medir el progreso técnico de las diversas soluciones que han surgido en esta trayectoria. Al final se ha optado por basar las estimaciones en un extenso estudio de Nordhaus (2006) que establece una unidad común denominada CPS (cómputos por segundo) y que permite mostrar gráficamente toda la historia de la computación en cuanto a desempeño y costo por unidad de rendimiento (gráfico 7.1).

a. Paradigmas en el procesamiento de información

La computación tiene su origen en las operaciones matemáticas básicas, y desde épocas muy remotas el ser humano ha intentado realizar estas actividades con mayor ra-

Gráfico 7.1

EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO DE LAS COMPUTADORAS (N=233)



Fuente: Nordhaus, W.D. (2006), *An Economic History of Computing*, New Haven, Departamento de Economía, Universidad de Yale (en línea) http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/computing_June2006.pdf.

Nota: medición de 241 innovaciones importantes.

pidez y exactitud; al comienzo se hizo de forma manual por medio de algoritmos y, cerca del año 500 a. C., con dispositivos como el ábaco, especialmente en el Lejano Oriente. El ábaco era un dispositivo computacional muy eficaz, y como se puede apreciar en el gráfico, la velocidad de computación de un maestro en ábacos superó la velocidad que las computadoras mecánicas y electromecánicas tenían hasta los años cincuenta. El 12 de noviembre de 1945 se realizó en Tokio una competencia para comparar el ábaco japonés y la máquina eléctrica, con el auspicio del periódico del ejército de Estados Unidos. Después de la prueba, el periódico *Nippon Times* reportó: “La civilización, en el umbral de la era atómica, se ha tambaleado el lunes por la tarde cuando el ábaco de 2.000 años de antigüedad derrotó a la calculadora eléctrica en la suma, la resta y la división, y en otro problema en el que se debían aplicar esas tres funciones además de la multiplicación. La máquina sólo fue superior cuando se realizó la multiplicación por separado”. Así, el ábaco superó a la calculadora eléctrica por 4 puntos contra 1 (Kojima, 1954). El paradigma de la computación con tubos de vacío acabó con la superioridad del ábaco y ofreció esta capacidad también a las personas que no han dedicado su vida a la práctica de la matemática.

Sin embargo, la era del procesamiento artificial de información tuvo un comienzo lento. Hasta el año 1800 se contaba con pocas máquinas de cálculo, principalmente gracias al aporte de Blaise Pascal (1642) y su Pascaline, un aparato que tenía la capacidad de procesar números hasta 999.999.999; los dispositivos de Wilhelm Schickard (1623); la calculadora de Leibnitz (1670), y la máquina diferencial de Babbage (1822), entre otras. El siguiente salto tecnológico se produjo en 1889 con la aparición de la primera computadora electromecánica; su creador fue Herman Hollerith y el objetivo prioritario fue procesar la información del censo de 1890 en Estados Unidos, tarea que demoró dos años y medio. El logro era inédito, dado que se estimaba que el análisis de los datos en forma manual hubiera llevado alrededor de 12 años. Con el ímpetu del éxito de la tabulación computacional del censo de Estados Unidos, la producción aumentó significativamente entre 1900-1910, y se vendieron más de 100.000 máquinas sumadoras de Burroughs que facilitaban los cálculos económicos.

Ya más cerca de la década de 1940 aparecen una serie de hitos importantes en la historia de la computación. Se abre una nueva época en la programación y se incorpora el importante componente del *software*, lo que convierte al *hardware* de computación en una tecnología de múltiples propósitos, es decir, se encamina la computación hacia una tecnología de propósito general. El diseño de una calculadora tradicional determina su funcionalidad, mientras que la funcionalidad de una computadora programable, por el contrario, es determinada por su *software*. Sin embargo, los primeros antecedentes de la programación surgen en 1804, con una idea de Joseph-Marie Jacquard que consistía en el empleo de unas rudimentarias tarjetas con perforaciones que controlaban los movimientos de un telar. El impacto de este descubrimiento no fue inmediatamente adoptado por los fabricantes de máquinas de cálculo, que generalmente construían sus sistemas para resolver problemas específicos. El próximo intento lo haría Ada Lovelace en 1843, cuando publica un artículo que describía y examinaba la máquina analítica de Babbage (1834), para la cual además desarrollaba el primer programa de instrucciones que la haría funcionar; no obstante, la

máquina nunca se terminó de construir. Entre 1936 y 1938 Konrad Zuse fabrica la primera computadora programable, la Z1, en la cual las instrucciones eran leídas desde una cinta perforada. Al contrario de una calculadora mecánica donde los procesos lógicos eran parte del diseño de la máquina, los procesos en la Z1 dependían de la cinta perforada que era introducida. Esta máquina contenía las principales partes de una computadora actual (unidad de control, memoria, microsecuencias, lógica de punto flotante, entre otras).

En 1943 aparece la primera computadora totalmente electrónica, *colossus*, construida con tubos de vacío. La arquitectura de Von Neumann surge en 1945, en una máquina que básicamente contaba con cinco partes: la unidad aritmético-lógica o ALU por su sigla en inglés, la unidad de control, la memoria, un dispositivo de entrada y de salida y el bus de datos que proporcionaba un medio de transporte de los datos entre las distintas partes. El año 1949 marca el nacimiento del lenguaje (*Short Code*). En 1951, Grace Hopper escribió el primer compilador, el A-0, que representó un paso muy importante para facilitar la programación, pero no fue hasta 1954 cuando apareció el que fue considerado como el primer lenguaje popular de programación, el *FORMula TRANslating system* (Fortran). Tal como indica su nombre en inglés, Fortran era capaz de traducir el idioma de las diferentes máquinas en un lenguaje de instrucciones común, introduciendo un tipo de estándar que derivó en vastos efectos de redes. Hoy día, éste es considerado como el primer lenguaje moderno de programación.

Las etapas posteriores están marcadas por el transistor; el primer dispositivo constituido íntegramente por transistores fue el Tradic (*TRANsistor DIGital Computer*) de los laboratorios Bell, elaborado en 1955. En 1958, John McCarthy creó el LIST Processing (LISP), un lenguaje que conceptualmente era bastante diferente a Fortran, ya que estaba enfocado al campo de la inteligencia artificial. Al mismo tiempo que nacía LISP también nació Cobol. Este idioma se creó a consecuencia de la necesidad de facilitar la entrada y salida de datos a los programas, permitiendo el uso de *strings*, vectores y otras estructuras de datos que no estaban en Fortran. En 1958 se crea Algol58, del cual surgirían otros lenguajes como C, Java o Pascal. Este último fue creado por Niklaus Wirth en 1968 para fines educativos; incorporaba los avances que trajeron los lenguajes anteriormente descritos, pero también innovaba con la introducción de conceptos como el puntero o la frase IN CASE OF. El lenguaje C fue desarrollado en 1972 por Dennis Ritchie, a partir de la necesidad de crear un idioma abstracto, fácil de programar y portátil.

En 1971 se presenta el primer microprocesador, el 4004 de Intel, mientras que en 1975 se anuncia el nacimiento de la computadora Altair 8800, basada en el *chip* 8080. En esta época la teoría de Gordon Moore sobre la integración del silicio se convierte en realidad con la disminución en el tamaño de los transistores, que era un intento de atenuar los problemas derivados de esta exigencia (efectos capacitivos). Se estima que en el año 2019 el tamaño de los transistores debería ser sólo de un par de átomos, por lo que se sabe que el período de innovación estructural, es decir, esta fase de aprendizaje a escala (*learning by scaling* en una fase de innovación continua) está llegando a su fin. Como parece haber llegado el límite de explotación del silicio para

finés computacionales, es de esperar que ocurra una innovación de sistema junto con una innovación de material durante la década que viene.

Es importante destacar que a partir de 1995 se puede observar una subdivisión significativa en el mercado de las computadoras, en computadoras de escritorio y en dispositivos móviles. En 1995, los equipos móviles representaron el 14% del total de los equipos, un 19% en 2000 y un 26% en 2005 (Computer Industry Almanac, 2006).

b. Indicadores del rendimiento

Como se ha señalado anteriormente, el diseño universal de una máquina de Turing consiste de diferentes operaciones, como la lectura de información desde el almacenamiento, la transformación de información en el procesador y la transmisión de los insumos y resultados entre ambos. El rendimiento final depende de la ejecución conjunta de todas estas operaciones. A través del tiempo se han desarrollado diferentes técnicas para medir el desempeño de una computadora; generalmente estos índices aglomerados se crean para medir un grupo de dispositivos de similar época, dado que la gran rapidez con que aparecen nuevas tecnologías deja obsoletos a los equipos anteriores. Como se ha mencionado, las primeras máquinas con las que se realizaban cómputos sólo eran capaces de sumar, y casi todos los dispositivos comerciales anteriores a la Segunda Guerra Mundial cumplían este único propósito. Por estas razones el tiempo que se demoraba la suma era la única medida de desempeño en esta época.

Hans Moravec, del instituto de robótica de la Universidad Carnegie Mellon ubicada en Pittsburgh, Estados Unidos, propuso una medición de rendimiento basada en una exhaustiva recopilación e información teórica. Este método resulta muy atractivo debido a que depende de la memoria, la longitud de la palabra, el tiempo de suma y el tiempo de multiplicación de una máquina, datos que existen para una gran mayoría de equipos antiguos y que incluso fijando las variables de memoria y longitud de palabra, se pueden utilizar para medir el rendimiento del cálculo manual y de ábacos. Precisamente por la facilidad para calcular este índice, no se incluye el rendimiento en instrucciones más complejas, y por eso no se lo utiliza en computadoras modernas. La fórmula es (Nordhaus, 2006):

Índice de Moravec sobre rendimiento computacional

$$\left\{ \frac{[6 + \log_2(\text{memoria}) + \text{longitud de palabra}] / 2}{[(7 \times \text{tiempo de suma} + \text{tiempo de multiplicación}) / 8]} \right\}$$

El estudio más antiguo acerca del rendimiento de las computadoras lo realizó Kenneth Knight en 1966. La fórmula propuesta es similar a la de Moravec, aunque incluye algunos parámetros más, debido a que fue necesario hacer ajustes para evaluar equipos un poco más modernos en esa época (Nordhaus, 2006):

Índice de Knight sobre rendimiento computacional

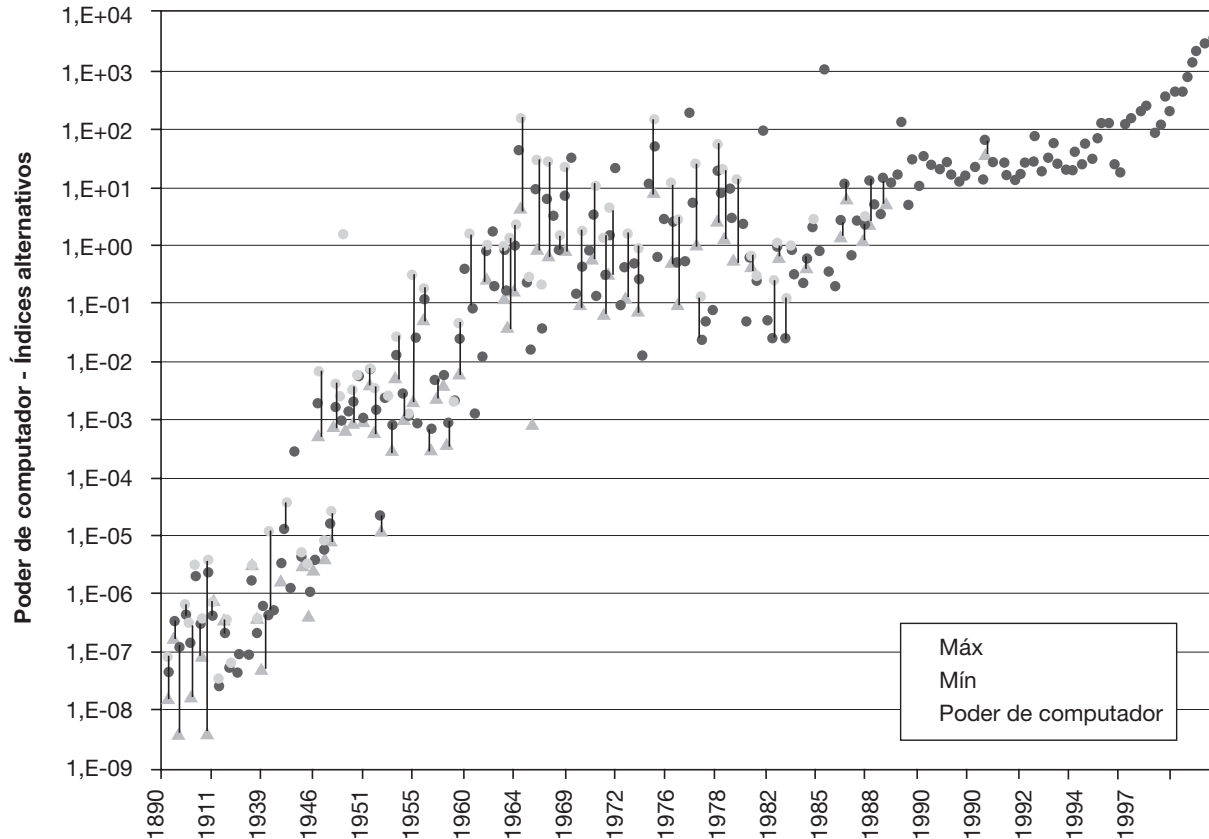
$$10^6 \left\{ \frac{[(\text{longitud de palabra} - 7)(\text{memoria})]}{[\text{tiempo de cálculo} + \text{input} - \text{output tiempo}]} \right\}$$

MIPS es la sigla de “millones de instrucciones por segundo”, una forma de medir la potencia de los procesadores. Sin embargo, esta medida sólo es útil para comparar procesadores con el mismo juego de instrucciones y usando puntos de referencia (*benchmarks*) que fueron compilados por la misma máquina y con el mismo nivel de optimización. Esto se debe a que la misma tarea puede necesitar un número de instrucciones diferentes si los juegos de instrucciones también lo son. En las mediciones comparativas, generalmente se representan los valores más altos, por lo que la medida no es del todo realista. Además, la utilización de la arquitectura de Von Neumann (según la cual se construyen todas las computadoras comerciales desde 1945) produce cuellos de botella en el bus de datos, debido a la demora que significa tener que leer las instrucciones desde la memoria de la computadora. Como MIPS sólo tiene que ver con el microprocesador, el desempeño total se determina únicamente por la potencia de la CPU y, por ejemplo, no se toma en cuenta el tiempo de acceso a la memoria. Debido a estos problemas, los investigadores han creado pruebas estandarizadas como SPEC para medir el funcionamiento real, y las MIPS han caído en desuso (Wikipedia, *s/f*).

Las mediciones efectuadas sobre la base de sumas, índices de instrucciones por segundo, o métodos más complejos como los de Moravec o Knight, no logran captar la complejidad de las computadoras actuales (Nordhaus, 2006). En la actualidad, estos dispositivos son sometidos a una serie de tareas estandarizadas, es decir se realiza un proceso de *benchmarking* y se evalúa el desempeño de las diferentes máquinas con este prisma común. La entidad encargada de realizar estas pruebas es la SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation o Corporación para la Evaluación Normalizada del Rendimiento), institución sin fines de lucro que ha sido formada por diversos fabricantes, universidades, consultores y una importante cantidad de actores en el rubro de las computadoras (para conocer más informaciones sobre las aplicaciones involucradas, véase SPEC, *s/f*).

A pesar de que los diferentes puntos de referencia (*benchmarks*) fueron establecidos para evaluar tareas específicas de cada época y no se pueden comparar con certeza en una primera instancia, los estudios de Nordhaus (2006 y 2002) demuestran que las medidas siguen una tendencia similar, por lo que en principio se pueden señalar equivalencias entre las distintas pruebas y así alcanzar un indicador común para todas las computadoras. La varianza se debe a las distintas metodologías que se utilizan en las diferentes pruebas (gráfico 7.2).

A este indicador uniforme Nordhaus lo denomina CPS, o cómputos por segundo. Su construcción se realiza a través de transformaciones entre los distintos puntos de referencia, que es posible debido a que algunas máquinas participan en más de una

Gráfico 7.2**RANGO DE ESTIMACIONES DE DIFERENTES ÍNDICES DE RENDIMIENTO**

Fuente: Nordhaus, W.D. (2006), *An Economic History of Computing*, New Haven, Departamento de Economía, Universidad de Yale [en línea] http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/computing_June2006.pdf.

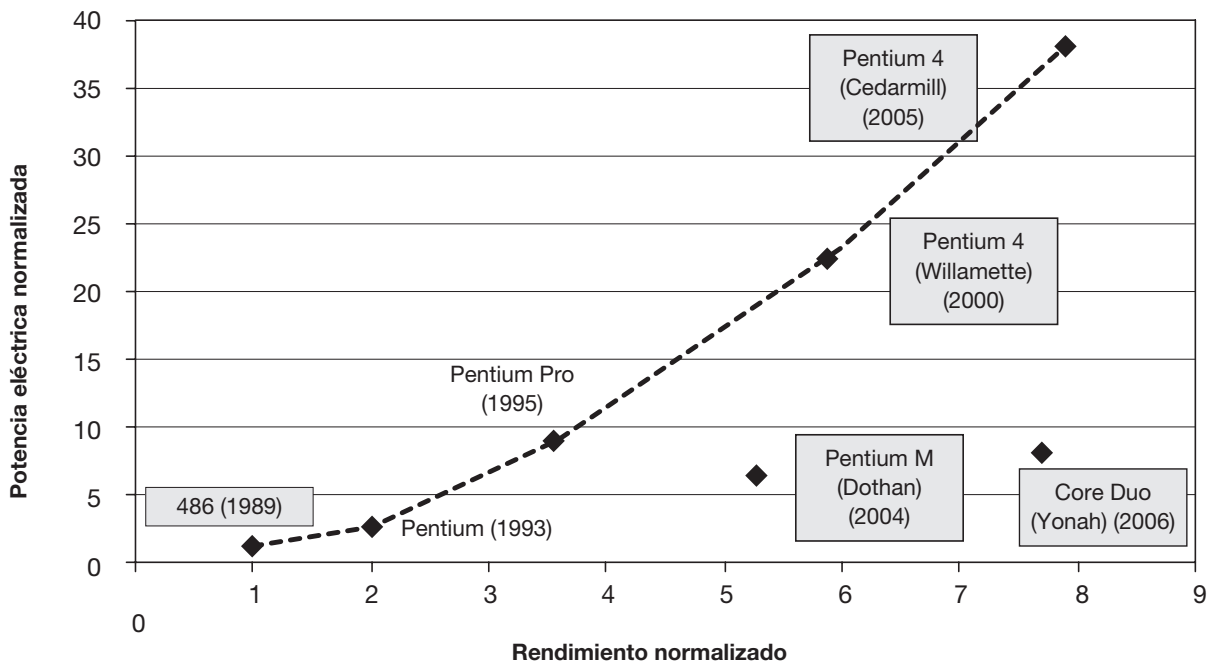
prueba de rendimiento; de esta forma se plantean ciertas equivalencias entre los tests, por lo que toda la lista de dispositivos se puede representar con un solo tipo de prueba. En este caso se dejan todos los datos en términos de MIPS, luego de lo cual se normalizan de modo que el cálculo manual (primer elemento de estudio) tenga el valor de 1 CPS.³⁰ Esta medida ha sido utilizada como base para la presentación de la evolución en el rendimiento de las computadoras a lo largo de la historia.

³⁰ En todos los estudios en los que se comparan niveles de desempeño se define una máquina para que tenga valor unitario, y a partir de allí se van construyendo las cifras para los demás dispositivos. Estos números se pueden interpretar como cuántas veces más potente es una máquina comparada con la elegida para tener valor 1. Particularmente en el estudio de Nordhaus se define el cálculo manual como 1 CPS, por lo que esta unidad deberá leerse como “cuántas veces” más potente en el cálculo de la máquina, comparada con el cálculo manual.

c. Consumo de energía

La necesidad de mejorar el rendimiento y velocidad de los procesadores presenta un problema que hasta hace algunos años no se consideraba: el consumo de energía. Según cifras de Intel (Grochowski y Annavaram), el Pentium 4 de 3.6 GHz llega a consumir la impactante cifra de 103 watts, por lo que en la industria ya hace años que se impulsan nuevas tecnologías eficientes, como se observa en Grochowski y Annavaram (2006) y Ramanathan y Agan (2006). A esto se suman las crecientes necesidades de las computadoras portátiles, que por su naturaleza necesitan de elementos con un consumo de energía menor, con el fin de prolongar el tiempo en que se mantienen alejadas de la red eléctrica. En el gráfico 7.3 se muestran los valores de rendimiento y consumo de energía para algunos procesadores modernos. Los datos han sido divididos por los valores del *chip* 486 con el fin de poder apreciar mejor los aumentos (gráfico 7.3).

Gráfico 7.3
CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA
SEGÚN EL RENDIMIENTO NORMALIZADO³¹



Fuente: Grochowski, Ed y Murali Annavaram (2006), "Energy per instruction trends in Intel microprocessors", Technology@Intel Magazine, marzo (en línea)
<http://www.intel.com/technology/magazine/research/energy-per-instruction-0306.htm>

³¹ Los términos "energía eléctrica" y "rendimiento" normalizados indican que las variables han sido divididas por los índices del microprocesador 486, con el objetivo de representar claramente la evolución de ambos parámetros.

Como es posible observar, previo a la aparición de los Pentium M (elaborados para computadoras portátiles) y la tecnología *multi-core*, la tendencia exponencial ya revelaba graves ineficiencias en el consumo de energía; para duplicar el rendimiento se necesitaba una cantidad de electricidad mucho mayor al doble. Afortunadamente, con la aparición de los sistemas *multi-core* parece subsanarse muy bien este problema porque bajan drásticamente los niveles de consumo. Cuando la máquina cuenta con un único procesador, se puede recalentar si éste debe funcionar a su máxima capacidad para ejecutar las funciones de un programa determinado, mientras que si existen diversos núcleos, o *cores*, sólo funcionará al máximo el *core* que soporte esa aplicación y los otros estarán más desahogados, lo que en conjunto hace que se genere menos energía. Además, los fabricantes están impulsando la eficiencia energética como un factor muy valorado, y se están concentrando en lograrlo en toda su línea de producción, tal como lo confirma Paul Otellini, presidente de Intel, el líder mundial en fabricación de microprocesadores: “Nuestro sector está atravesando el cambio más profundo en varias décadas, y está entrando en una nueva era en la cual el rendimiento y la eficiencia en términos de consumo de energía son clave en todos los segmentos del mercado y en todos los aspectos relacionados con la informática”.

d. Conclusiones

Es posible apreciar el enorme y cada vez más rápido aumento en el rendimiento de las computadoras. La tendencia se asemeja a un crecimiento doblemente exponencial a través de la historia, lo que resulta en que una presentación a escala logarítmica del eje de rendimiento muestre de nuevo un crecimiento exponencial. Se puede observar que la curva se acelera desde la década de 1940, años marcados por la creación de las primeras computadoras programables, la aparición de la arquitectura de Von Neumann, la invención del transistor y, en el contexto internacional, la demanda inmediata de computadoras potentes provocada por la Segunda Guerra Mundial, entre otros acontecimientos. En la representación de los costos por unidad de rendimiento, estos decrecen exponencialmente a partir de la misma época mencionada.

El consumo de energía en las computadoras se estaba volviendo preocupante hasta hace algunos años, cuando había llegado a los 100 watts. Este hecho, sumado a la masificación de sistemas móviles (que requieren niveles menores de consumo) y algunas consideraciones acerca del costo de la energía produjo que los representantes del sector de la informática enfocaran sus esfuerzos en hacer disminuir estos indicadores.

8. EVOLUCIÓN EN EL ALMACENAMIENTO³²

Desde que los primeros *homo sapiens* utilizaron las pinturas rupestres para almacenar información en una solución tecnológica, hemos recurrido a múltiples mecanismos hasta llegar a medios como las memorias holográficas. Se estima que desde 40000 a. C. se emplearon pinturas a base de pigmentos vegetales sobre rocas para almacenar símbolos representativos en dispositivos externos. Esta forma de almacenar información corresponde al primer paradigma de la avenida de innovación respectiva. Siguiendo la misma lógica, se inventó el papiro (3000 a. C.) (Papelnet. cl, s/f), el cual reemplazaba a las rocas como medio que se impregnaba con los pigmentos vegetales. El incentivo clave para esta innovación de material fue la ventaja de transmitir información en una solución móvil. Aproximadamente en el año 100 a. C. se creó un papel hecho de fibras vegetales (Papelnet.cl, s/f; textoscientificos.com, s/f; invent.ar, 2001, Specialized Systems Software, Inc., s/f), el cual dadas sus características significó un cambio revolucionario con respecto al papel que se utilizaba hasta entonces; así se constituyó en el segundo paradigma en la historia del almacenamiento de datos.³³

En 1453 se logró masificar notoriamente el almacenamiento de información con la invención de la famosa imprenta de Johann Gutenberg (1397-1468). Esta vez no fue una innovación de material sino del sistema, ya que se innovó en el diseño del proceso en lugar del medio.³⁴ En 1725 se introdujo una innovación estructural, que

³² Este capítulo fue elaborado por Cristian Claudio Vásquez, de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile y Martin Hilbert, de la Cepal.

³³ El papiro utilizado alrededor del año 3000 a. C. se obtenía a partir de hojas de una planta llamada *Cyperus papyrus*, la cual se caracterizaba por sus hojas largas, tallos blandos, de parte inferior muy gruesa y sección triangular. El proceso de fabricación del papiro consistía en cortar los tallos de la planta y dejarlos reblandecer durante más de 30 días en aguas fangosas, lo que los hacía más flexibles. Una vez que se retiraban los tallos del agua, se entrecruzaban sus fibras y se dejaban secar al sol o cerca de una hoguera, en un proceso que era extremadamente lento. La producción de papel es más rápida y eficaz [5, 6] (Papelnet.cl, s/f; textoscientificos.com, s/f).

³⁴ La imprenta es un método de reproducción de textos e imágenes sobre papel o materiales similares que consiste en aplicar una tinta –generalmente oleosa– sobre unas piezas metálicas llamadas tipos, para transferirla a papel por presión.

afectó en menor medida al material y al sistema, dado que se seguía utilizando una base de papel y un proceso sofisticado que consistía de presionar sobre este papel para guardar la información. Pero ya no eran letras ni dibujos los que se colocaban, sino un código especial. La tarjeta perforada (Jims Journal, 2000 y Cardamation Company, s/f) fue unida a un elaborado mecanismo de lectura y escritura utilizados para recuperar e introducir datos a las máquinas, que permitió realizar rápidas operaciones y ahorrar tiempo con respecto a los mecanismos tradicionales.³⁵ En este paradigma comenzó la búsqueda del código más eficaz para almacenar información.

Después de 1725 se siguieron desarrollando tecnologías para almacenar más datos y hacerlo de mejor manera (por ejemplo, el fonógrafo 1877) (Alonso, 2003). Sin embargo, no fue hasta 1898 (con la invención del telegrafo) cuando el almacenamiento magnético define un quinto paradigma. Esta innovación de material y de sistema permitía la reutilización para almacenar distintos datos una y otra vez, que la diferenciaba de las anteriores. Esto dio paso a una amplia generación de tecnologías de almacenamiento que variaron en sus requerimientos según diferentes propósitos.

Alrededor de 1980 surge la tecnología óptica (GrabarHDDVD, 2006), con la que se almacena la información mediante haces de luz que interpretan las refracciones provocadas sobre su propia emisión. Los soportes más conocidos que hacen uso de este tipo de almacenamiento son el CD-ROM y el DVD.³⁶

Si se analizan 409 innovaciones importantes, se pueden definir cuatro paradigmas:

1. *Pinturas rupestres*, desde miles a. C. hasta 100 a. C., un período de miles de años.
2. *Papel*, desde 100 a. C. hasta 1453, un período de 1.553 años.
3. *Imprenta mecánica*, desde 1453 hasta 1750, un período de 297 años.
4. *Tarjetas perforadas*, desde 1750 hasta 1898, un período de 148 años.
5. *Almacenamiento magnético*, desde 1898 hasta 1980, un período de 82 años.
6. *Almacenamiento óptico*, desde 1980 hasta hoy, es decir, más de 27 años.

Para poder medir el desempeño de la frontera tecnológica durante la evolución de las distintas soluciones de almacenamiento de información a lo largo de la historia, es necesario definir las variables determinantes. La capacidad de información que puede ser almacenada depende, en primer lugar, de su tamaño. Teóricamente, sería posible guardar la misma información que contiene una película digital en un DVD de 8 gigabytes, en un código compuesto de granos de arroz grises y blancos de un centí-

³⁵ Las tarjetas perforadas se introducían en ranuras dentro de las máquinas textiles; la máquina las leía y dependiendo del “mensaje” que contuvieran se conseguía un tipo de tejido u otro. Las tarjetas se perforaban estratégicamente y se acomodaban en cierta secuencia para indicar un diseño de tejido en particular.

³⁶ Existen otros en desarrollo como el EVD, el *Blu-Ray* y el HD-DVD. En general, la mayoría de las tecnologías ópticas existentes se fabrican con un disco grueso, de 300,2 (mm), de policarbonato de plástico, al que se le añade una capa refractante de aluminio; posteriormente se le agrega una capa protectora que lo cubre y, opcionalmente, una etiqueta en la parte superior.

metro de longitud cada uno. La lógica del código compuesto de granos de arroz sería similar a la del DVD, pero la cantidad de granos sería tal que habría que orbitar el ecuador unas 17 veces para colocarlos uno seguido del otro. De esa manera también se haría más lenta la lectura, lo que es otro determinante significativo para medir la capacidad de almacenamiento. Por tanto, se revisará la capacidad de almacenamiento según su extensión en el espacio, según su costo y según la velocidad de acceso.

a. Capacidad de almacenamiento por espacio

Si se despliega la avenida de innovación de las tecnologías de almacenamiento por su capacidad por centímetro cuadrado en una escala semilogarítmica,³⁷ se puede observar que la cantidad de megabytes (MB) por centímetro cuadrado se ha incrementado exponencialmente a lo largo de la historia. Para estimar la avenida de innovación se consideran 474 innovaciones en tecnología de almacenamiento de información (gráfico 8.1).

Como se ha visto en la primera parte del libro, existen diferentes soluciones de almacenamiento para satisfacer necesidades particulares, como la conservación, la lectura rápida o el costo. La multiplicidad de esquemas de almacenamiento se puede clasificar en tres tipos: el almacenamiento primario,³⁸ que se caracteriza por la rapidez en grabar y leer información; el almacenamiento secundario y fuera de línea,³⁹ que se caracteriza por la capacidad de mantener información sin usar energía; y el almacenamiento terciario,⁴⁰ que se caracteriza por ser externo con respecto al sistema que procesa la información comúnmente. Ha ocurrido muchas veces que una tecnología podía cumplir múltiples propósitos dependiendo del rubro, los avances tecnológicos e incluso la época (a veces también en diferentes épocas). Por ejemplo, el conocido *floppy disk* y las cintas magnéticas fueron utilizados como almacenamiento primario por algún tiempo, y después fueron reemplazados por soluciones más rápidas. En

³⁷ Es importante destacar que la variable de desempeño del eje Y se presenta en una escala logarítmica, y por esa razón un crecimiento exponencial está presentado de forma lineal.

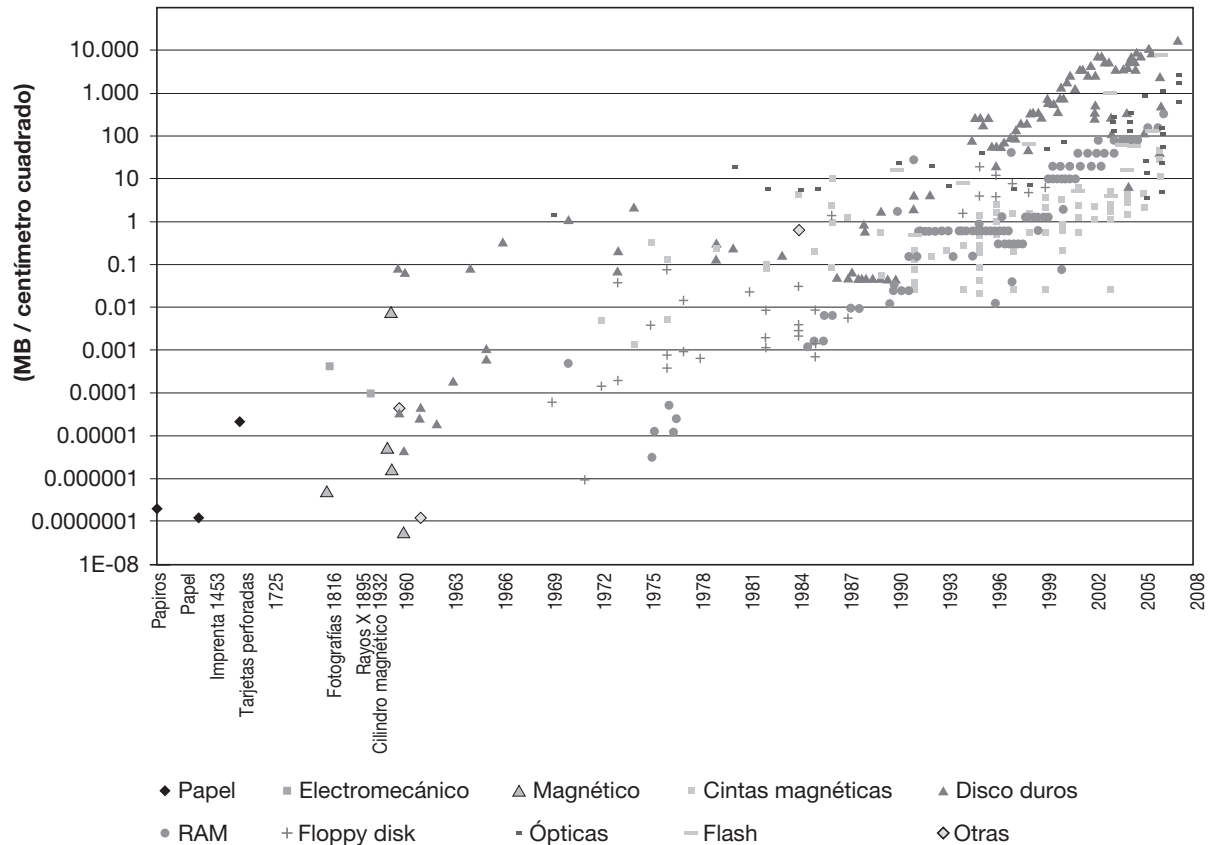
³⁸ El almacenamiento primario está directamente conectado a la unidad central del ordenador. Debe estar presente para que la CPU funcione correctamente. El almacenamiento primario consiste en tres tipos de almacenamiento: los registros, la memoria caché y la memoria principal.

³⁹ La memoria secundaria requiere que el ordenador use sus canales de entrada y de salida para acceder a la información y es usada para almacenar la información a largo plazo. A la memoria secundaria también se la llama “almacenamiento masivo”; habitualmente, la memoria secundaria o de almacenamiento masivo es de mucha mayor capacidad que la memoria primaria.

⁴⁰ La memoria terciaria es un sistema donde un brazo montará (conectará) o desmontará (desconectará) un medio de almacenamiento masivo fuera de línea (externo al ordenador) según lo pida el sistema operativo de la computadora. La memoria terciaria se usa en el área del almacenamiento industrial, la computación científica, en grandes sistemas informáticos y redes empresariales. El almacenamiento fuera de línea es un sistema donde el medio de almacenamiento puede ser extraído fácilmente del dispositivo de almacenamiento.

Gráfico 8.1

CAPACIDAD DE TODAS LAS TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO



Fuente: elaboración propia.

Nota: medición de 474 innovaciones importantes.

general, las soluciones obsoletas se mueven hacia niveles más bajos en la jerarquía de almacenamiento. Por ejemplo, en un principio (hasta 1973) las memorias del tipo RAM todavía no habían sido construidas y los discos duros cumplían la función de tecnología de almacenamiento primario, mientras que en la actualidad cumplen la función de tecnología de almacenamiento secundario.

Hasta hoy día, el papel sirve como uno de los medios de almacenamiento de información dominantes. Sin embargo, para el procesamiento artificial de información, el papel dejó de ser un medio primario relevante después del paradigma de las tarjetas perforadas. Luego fueron los discos duros que cumplieron el rol del almacenamiento primario, y desde los años setenta fueron reemplazados por las memorias del tipo RAM⁴¹ (*random access memory*), que aún predominan en esta actividad. Duran-

⁴¹ *Random* (que significa “aleatorio” en inglés), porque se puede acceder a cualquier lugar del almacenamiento sin discriminar.

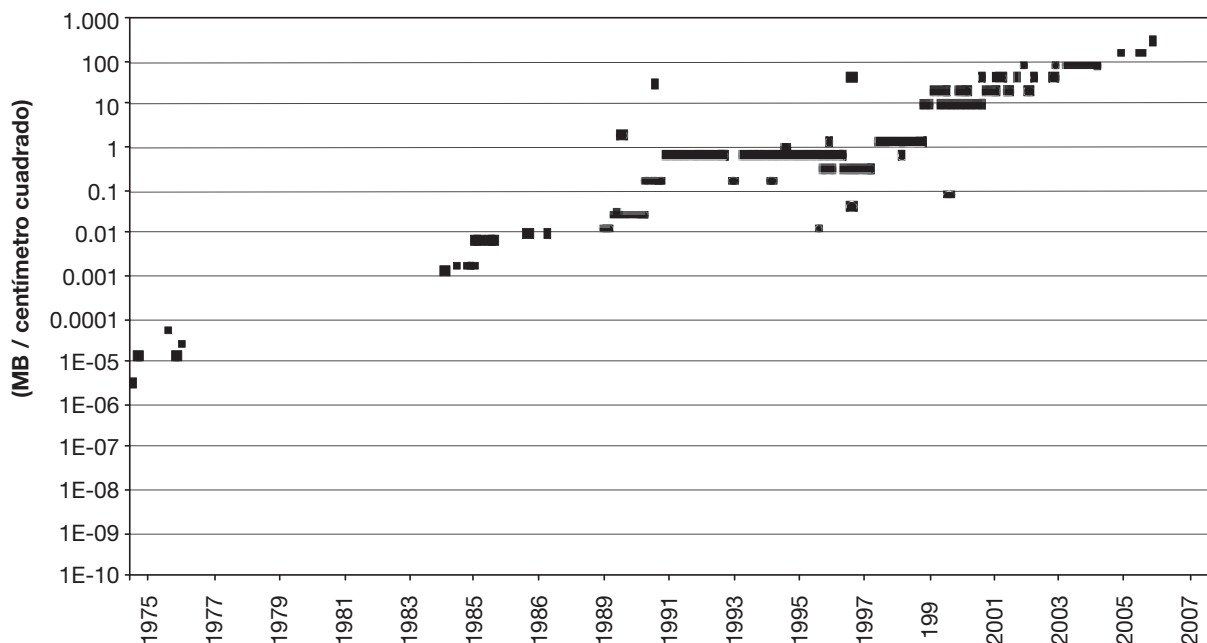
te un asombroso proceso de innovación continuo (*learning by scaling*, en el sentido de Sahal, 1978), con esta tecnología se incrementó la capacidad de almacenamiento desde 0,000003 MB por cm^2 en 1975, hasta 317.000 MB por cm^2 en 2006. Al mismo tiempo de ser un medio mucho más económico, los discos duros siguieron multiplicando su desempeño como almacenamiento secundario, especialmente desde los años noventa, cuando los avances en la transmisión de información ya exigían más capacidad de almacenamiento.

Como se puede apreciar en los gráficos 8.2, 8.3 y 8.4, el patrón tecnológico del almacenamiento primario (RAM) y del almacenamiento secundario (discos duros) es mucho menos disperso que la avenida de innovación del almacenamiento terciario, que se mide según la cantidad de bytes por cm^2 (cintas magnéticas, *floppy disk*, ópticas, *flash*). A continuación se muestran las diferentes trayectorias tecnológicas de forma separada.

El caso de los discos duros puede ser considerado como una innovación estructural de la mejora en la densidad de grabación, que se logró principalmente mediante la fabricación de cabezales de ferrita (óxido de hierro, desde 1975 hasta 1989), de cabezales de película delgada (desde 1985 hasta 1995) y posteriormente de cabezales magneto-resistivos (desde 1995 hasta la actualidad). Sin embargo, un cambio de tec-

Gráfico 8.2

CAPACIDAD PARA GUARDAR INFORMACIÓN
DE ALMACENAMIENTO PRIMARIO RAM

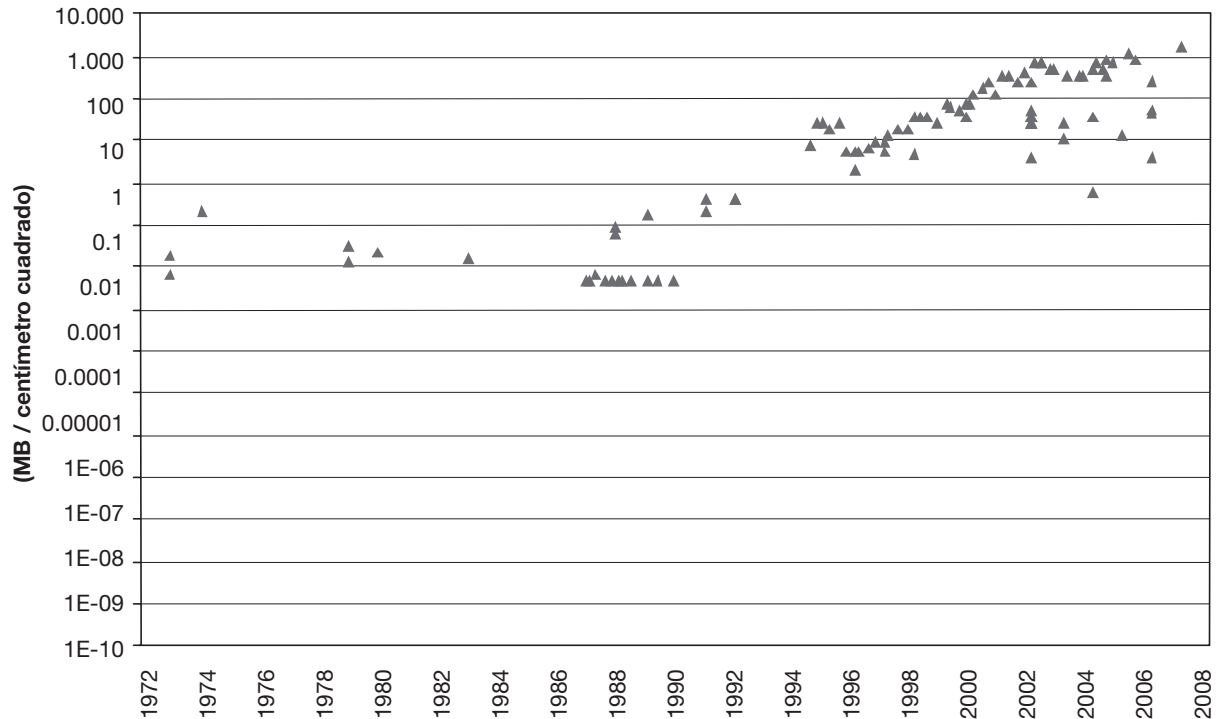


Fuente: elaboración propia.

Nota: medición de 154 innovaciones importantes.

Gráfico 8.3

CAPACIDAD PARA GUARDAR INFORMACIÓN DE ALMACENAMIENTO SECUNDARIO, DISCOS DUROS

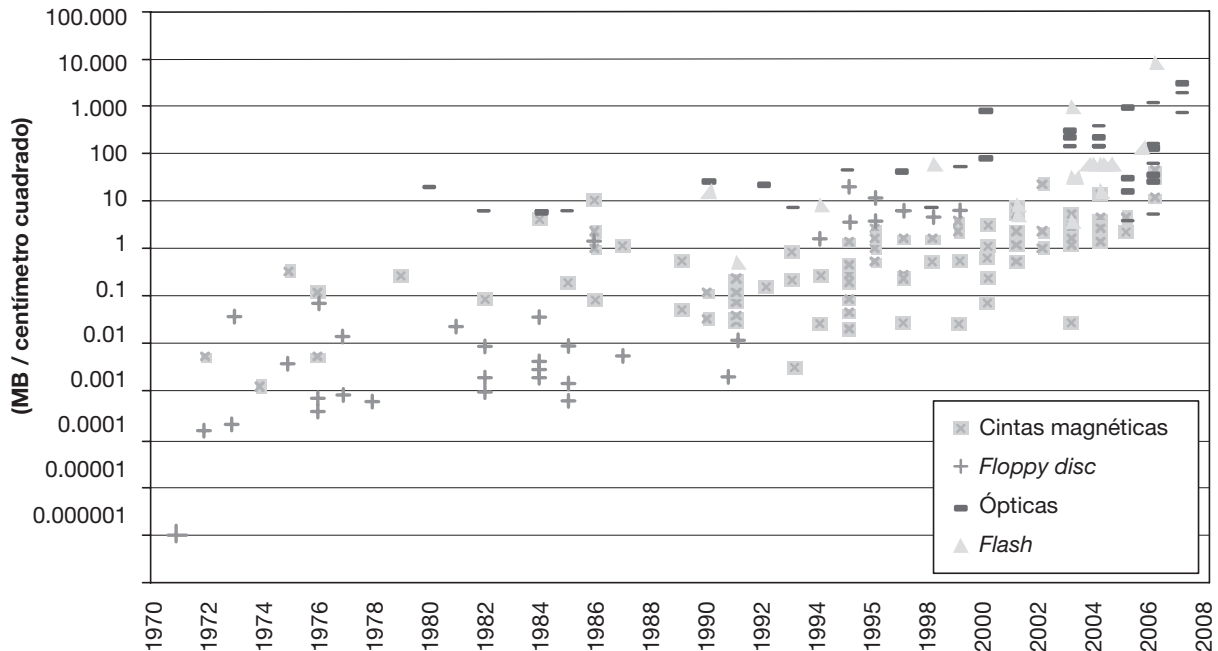


Fuentes: elaboración propia, sobre la base, entre otros, de McCallum, 2001-2007, www.Hitachi.com, www.IBM.com, www.kingston.com, www.ecma-international.org, www.tacp.toshiba.com, www.qic.org y fuentes señaladas en Hilbert, M. P. López y C. Vásquez (2008).

Nota: medición de 98 innovaciones importantes.

nología característico en los discos duros fue el cambio de los discos removibles (líderes desde 1962 hasta 1978) por los discos Winchester de 14 pulgadas en 1978 (Christensen, 1999).

En las tecnologías de almacenamiento terciario se destaca la gran multiplicidad de dispositivos que comparten el mercado, principalmente las tecnologías ópticas, como CD y DVD, además de las cintas magnéticas y las memorias del tipo *flash*. En cada una de las tres tecnologías mencionadas se ha incrementado la capacidad de almacenamiento a lo largo de la historia; sin embargo, los principales hitos en lo que respecta a megabytes por centímetro cuadrado han acontecido con las tecnologías ópticas y las memorias del tipo *flash*. Se destaca en el almacenamiento terciario de datos que a partir de 1970 suelen coexistir múltiples tecnologías, lo que entrega como resultado gran diversidad en el mercado. Esto se puede deber a que existen diversos requerimientos en este tipo de almacenamiento, con necesidades tan variadas como portabilidad, durabilidad y capacidad. De esta manera, es como si las empresas produc-

Gráfico 8.4**CAPACIDAD PARA GUARDAR INFORMACIÓN DE ALMACENAMIENTO, TERCIARIOS**

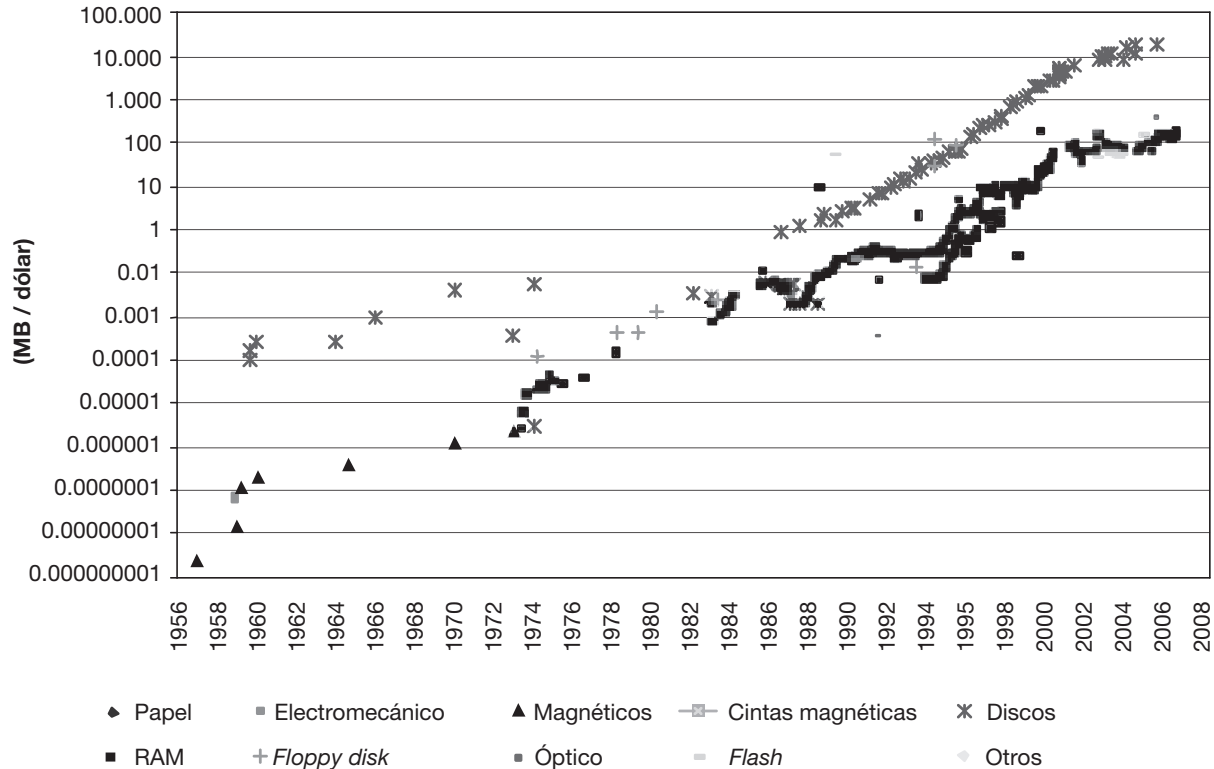
Fuentes: elaboración propia, sobre la base, entre otros, de McCallum, 2001-2007, www.Hitachi.com, www.IBM.com, www.kingston.com, www.ecma-international.org, www.tacp.toshiba.com, www.qic.org y fuentes señaladas en Hilbert, M. P. López y C. Vásquez (2008).

Nota: medición de 181 innovaciones importantes.

toras de tecnologías de almacenamiento terciario quedarán cautivas de sus propios clientes.

b. Costos de tecnologías de almacenamiento

Al reemplazar la variable de desempeño de MB por cm^2 con MB por dólar, se puede apreciar que las avenidas de innovación se extienden de una forma mucho menos dispersa. Esta es la prueba de que en este caso existe una inflación de demanda en la evolución tecnológica, aunque el empuje tecnológico introduce algunas dispersiones innegables. Como es característico para todas las TIC, estos costos han disminuido a lo largo del tiempo a pesar de que los nuevos dispositivos de almacenamiento son mucho más prácticos, poseen mayores capacidades y en muchos otros aspectos son mejores que los anteriores. En el gráfico 8.5 se muestra claramente esta tendencia. La escala logarítmica en el eje Y destaca que cada vez que se ha incorporado una nueva

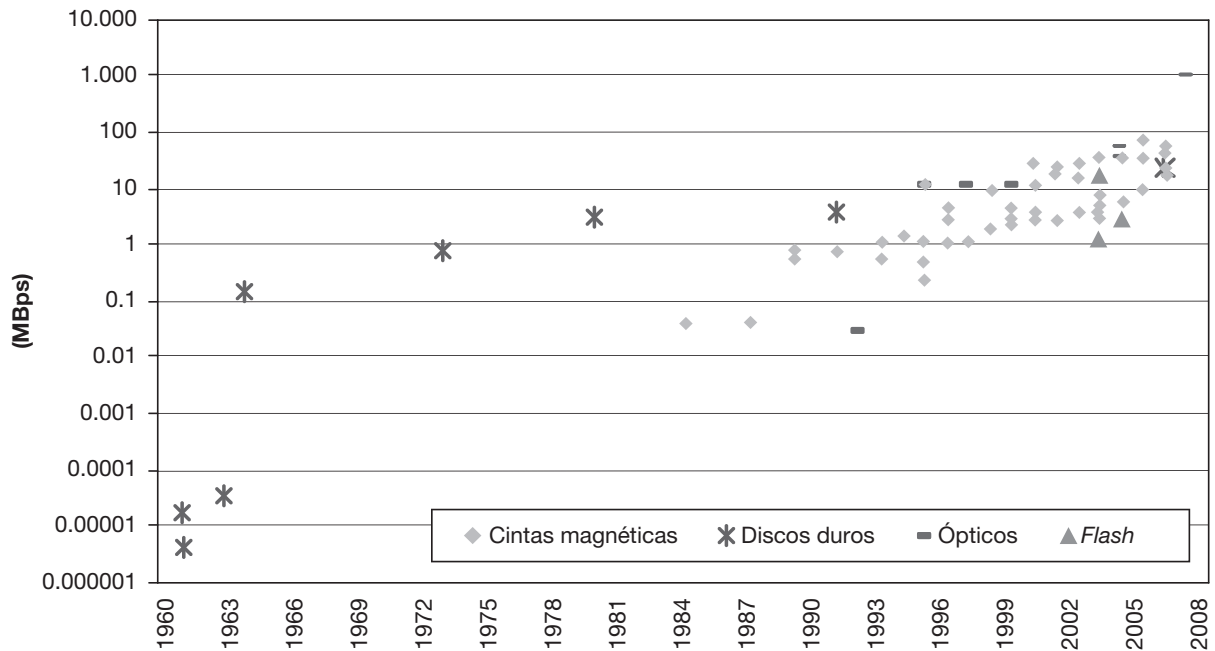
Gráfico 8.5**MEGABYTES POR DÓLAR, PARA TODAS LAS TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO**

Fuentes: elaboración propia, sobre la base, entre otros, de McCallum, 2001-2007, www.Hitachi.com, www.IBM.com, www.kingston.com, www.ecma-international.org, www.tacp.toshiba.com, www.qic.org y fuentes señaladas en Hilbert, M. P. López y C. Vásquez (2008).

tecnología, ésta no ha sido necesariamente más barata que la anterior, aunque su precio suele disminuir a lo largo del tiempo.

c. Velocidad de acceso al almacenamiento

Tal como se ha señalado en la primera parte del libro, la velocidad de acceso al almacenamiento es decisiva para el procesamiento de información, ya que el diseño de una máquina de Turing exige que se guarde a mediano plazo la información leída y grabada, para poder ejecutar los cálculos. En el gráfico 8.6 se muestra la evolución de las tecnologías de almacenamiento en lo que respecta a su velocidad de acceso, y de esta propiedad también se destaca la mejora en su desempeño. Sin embargo, es notable que el dinamismo en el mejoramiento de la velocidad de acceso es mucho menor que el rápido aumento de almacenamiento por dólar, y se concentra principalmente en tecnologías de almacenamiento terciario, como las cintas magnéticas. Esta

Gráfico 8.6**VELOCIDAD DE ACCESO EN MEGABYTES POR SEGUNDO**

Fuentes: elaboración propia, sobre la base, entre otros, de McCallum, 2001-2007, www.Hitachi.com, www.IBM.com, www.kingston.com, <http://www.hynix.com>, www.ecma-international.org, www.tacp.toshiba.com, www.qic.org y fuentes señaladas en Hilbert, M. P. López y C. Vásquez (2008).

situación conduce a uno de los desafíos actuales más grandes para la evolución de las memorias, que consiste en el progreso tecnológico según la variable de velocidad de acceso, lectura y escritura en los almacenamientos de información.

d. Conclusiones

Se destaca en el almacenamiento de datos que a partir de 1970 coexisten múltiples tecnologías, lo que entrega como resultado una gran diversidad en el mercado y al mismo tiempo una gran dispersión. Así se reafirman las diferentes necesidades a cubrir y las múltiples variables de desempeño que pueden ser consideradas, como por ejemplo la eficacia en el tamaño de una memoria, su costo económico y la velocidad de acceso.

Después de este estudio se puede observar un crecimiento constante en lo que respecta a la capacidad de las tecnologías de almacenamiento, tanto en su rendimiento general como en la evolución de cada una de sus aplicaciones (almacenamiento primario, secundario y terciario). De la misma manera, se nota una disminución incipiente en los costos de producción, y un notable desarrollo de las tecnologías de alma-

cenamiento de datos en lo que respecta a su velocidad de acceso. Todos estos avances ayudaron a los fabricantes a sostener la tasa histórica de mejoramiento de desempeño a la que estaban acostumbrados sus clientes.

También se puede afirmar que actualmente existe una fuerte competencia por desarrollar una tecnología de almacenamiento que prevalezca por sobre el resto; es así que se han logrado grandes avances en el almacenamiento óptico (especialmente en los *Blu-ray* y HD-DVD). Por otro lado, se corrobora la teoría que se refiere al acortamiento de los períodos de duración de los paradigmas, y es por eso que se podría esperar que futuros paradigmas duren cada vez menos tiempo antes de ser reemplazados.

9. CONCLUSIONES Y PROYECCIONES SOBRE LAS TRAYECTORIAS FUTURAS DE LAS TIC⁴²

Como lo demuestran los gráficos que se han presentado, las mejoras en el rendimiento de soluciones vinculadas a las TIC se caracterizan por el crecimiento exponencial, e incluso parece haber sido así desde mucho antes del paradigma digital. La naturaleza no ergódica del progreso técnico exige que se tomen las muestras más amplias posibles, debido a que los extractos pequeños sólo revelan un subparadigma de la trayectoria más amplia y no son representativos a nivel estadístico. En el ejercicio se ha expuesto que el crecimiento exponencial se mantiene a través de los cambios de paradigma; los casos analizados también concuerdan con la teoría de progreso técnico, ya que cada paradigma tecnológico consecutivo se va haciendo más corto y el ciclo de innovación se va acelerando. Además, es evidente que, durante el paradigma digital, incluso la escala semilogarítmica muestra una curva cada vez más ascendente y pareciera que la acumulación exponencial ha llegado al punto en que la curva “choca contra la pared”, por decirlo de forma coloquial. Aunque no sea posible predecir el futuro de esta tendencia, se pueden alcanzar varias conclusiones.

Primero, se debe recordar la naturaleza del crecimiento exponencial, aun cuando sea difícil de percibir para los seres humanos. Este crecimiento comienza muy lentamente, haciendo que la curva no presente mayores cambios, y después de un largo período de aparente progreso lento, se acelera y comienza a dar saltos gigantescos. Una conocida anécdota ejemplifica lo difícil que es percibir el crecimiento exponencial; un emperador chino quería hacerle un reconocimiento al inventor del ajedrez por su ingenio. El inventor pidió que se le diera un grano de arroz por el primer cuadrado del tablero de ajedrez, dos por el segundo cuadrado, cuatro por el tercero, ocho por el cuarto, dieciséis por el quinto, treinta y dos por el sexto, y así sucesivamente con un aumento exponencial. Sorprendido por la aparente humildad, el emperador aceptó inmediatamente. Después de la primera fila, el inventor había acumulado 128 granos de arroz en una cuchara; después de la segunda fila, había alcanzado los 32.768 granos en un recipiente grande; al pasar por la tercera fila ya poseía 8.388.608 granos de arroz en varios sacos; y después de terminar de contar la primera mitad del tablero, el inventor ya contaba con más de 4.000 millones de granos en un enorme depósito.

⁴² Este capítulo fue elaborado por Martin Hilbert, de la Cepal.

Al haber duplicado las cantidades 63 veces en el último cuadrado, se hubiera necesitado cubrir la superficie entera del planeta –incluso los océanos– con arrozales para satisfacer la deuda pendiente de billones de granos. Hay dos versiones de la anécdota; según una de ellas, el emperador quedó en la bancarrota, y según la otra, el inventor del ajedrez perdió la cabeza.

Muchas veces se subestiman las implicaciones de la tasa de crecimiento exponencial cuando se mira hacia el futuro (Kurzweil, 2001). Normalmente se espera que los próximos diez años traerán “diez años de progreso técnico” al ritmo actual; sin embargo, los índices de crecimiento exponencial demuestran que el rendimiento se duplica cada cierta cantidad de años. Esto significa que durante un período en el futuro (de dos o tres años) viviremos el mismo paso tecnológico que se ha vivido desde el comienzo del paradigma. Es decir, para mirar 2-3 años hacia el futuro, el punto de referencia debe estar algunas décadas hacia atrás. Por ejemplo, en el próximo período de dos o tres años veremos el mismo progreso en la computación que el que vivimos en el período del comienzo de los setenta hasta hoy. En comparación, en 1973 fue cuando se creó la computadora personal del Xerox Palo Alto Research Center en Estados Unidos, y en 2008 había casi 100 millones de avatares virtuales en Habbo Hotel y Second Life.

Mientras que transcurrieron largos períodos entre innovaciones como la invención del papel en China y la imprenta de Gutenberg; el ábaco y el motor diferencial de Babbage; las señales de humo y el telégrafo de Chappe, los intervalos entre innovaciones para procesar información parecen acortarse. En la actualidad, la convergencia de las TIC en el código binario prácticamente ofrece nuevas soluciones tecnológicas cada semana.

Mientras en el sector informático se produce un profundo debate sobre la naturaleza de la ley de Moore (Tuomi, 2002; Schaller, 2004), la característica de largo plazo del crecimiento exponencial hace que sea menos importante si la potencia de procesamiento se duplica cada dos años, cada 18 meses, todos los años, o tal vez cada tres años. En realidad, la teoría del progreso técnico que se ha presentado hace altamente improbable que se pueda señalar una tendencia fija en tanto detalle. Lo más importante que se debe considerar es que aparentemente existe algún grado de crecimiento exponencial. Para captar la tendencia general del progreso técnico en las TIC y poder evaluar las consiguientes implicaciones para las políticas oficiales, es indispensable recordar este “aparente” índice exponencial, que es diferente de otras trayectorias tecnológicas y contrasta totalmente con la capacidad de nuestro cerebro para procesar información, que se mantiene casi igual.

La evidencia empírica que se ha presentado en los capítulos anteriores representa una prueba del crecimiento exponencial, pero aún hace falta aclarar las razones del crecimiento exponencial de las soluciones de TIC. Una de esas razones podría ser que las externalidades de las redes conducen a una inflación de demanda (*demand pull*) exponencial de las innovaciones tecnológicas. Como se ha mencionado, de los efectos de una red se deriva que el valor de una red de información crece $(X^2 - X)$ por cada fuente de información y receptor X que se suma, lo que resulta en un crecimiento exponencial de valor por agregado lineal de nodos de información a la red. Otra ex-

plicación podría ser la creación de un círculo virtuoso entre avances en las TIC y la creación de conocimiento para mejorar el rendimiento de las TIC. En este sentido, los avances en la potencia de procesamiento actúan como amplificadores de nuestra inteligencia, que a la vez también nos ayuda a mejorar la potencia de procesamiento de información. La naturaleza de ese círculo sería exponencial y el mayor aporte de las herramientas permite a los ingenieros dar pasos cada vez más grandes. A medida que las máquinas progresivamente más potentes nos ayudan a crear nuevas máquinas, el resultado es un crecimiento exponencial en la potencia de esos instrumentos. La razón por la cual se puede observar un doble índice de crecimiento exponencial en el campo de las innovaciones puede estar relacionada con la naturaleza del conocimiento codificado en las herramientas digitales, porque como no ocupa un espacio físico, puede ser consumido y copiado sin competencia. De esta manera se hace muy fácil transferir la capacidad de trasladar información de una máquina de Turing universal a otra. Por ejemplo, puede llevar horas capacitar a un ser humano para desempeñar una simple tarea y cada persona debe pasar por el mismo proceso. Sin embargo, una vez que se ha incorporado una destreza a una máquina, como la capacidad de extraer la raíz cuadrada, todas las máquinas poseen el mismo potencial, ya que es muy fácil traspasar esta capacidad de una máquina a otra con la función copiar-pegar. Al mismo tiempo que es mucho más fácil traspasar conocimiento codificado entre máquinas, la capacidad de éstas puede avanzar mucho más rápido en comparación con los seres humanos, lo que deriva en una tasa de crecimiento exponencial de la capacidad de procesamiento de información artificial. Si bien este razonamiento se aplica especialmente al progreso en la capacidad de procesar información, otros subsistemas de TIC podrían depender de estos avances. De estas afirmaciones se desprende que el crecimiento exponencial de las TIC no sólo tiene una justificación empírica, sino también teórica.

Como la teoría sobre la innovación exponencial de las TIC no es concluyente, perdura la interrogante sobre el futuro de esta tendencia. Según algunos autores, la tasa de crecimiento exponencial se mantendrá y “la singularidad está cerca” (*The Singularity is Near*, Kurzweil, 2005). Los seres humanos pueden procesar alrededor de 25 fotos por segundo, una limitación que ha sido utilizada en las películas de dibujos animados para crear la percepción de movimiento. Si uno imagina que una máquina tiene la misma capacidad y su rendimiento se duplica con una cierta frecuencia, en el próximo paso la máquina podrá procesar 50 fotos por segundo, luego 100, 200 y, en un próximo salto, 400 imágenes por segundo. Esta es la capacidad visual de una mosca de la fruta, que percibe una mano que se le acerca en cámara lenta. También se puede analizar al revés: la máquina procesa 25 imágenes en 0,0625 segundos, luego en 0,03125 segundos y en el próximo paso en 0,015625 segundos. Este fenómeno llevó a Vernor Vinge (1993) a hablar de esta tendencia hacia la singularidad tecnológica, un punto en el que las máquinas procesan información más rápido de lo que es capaz de comprender la inteligencia biológica.

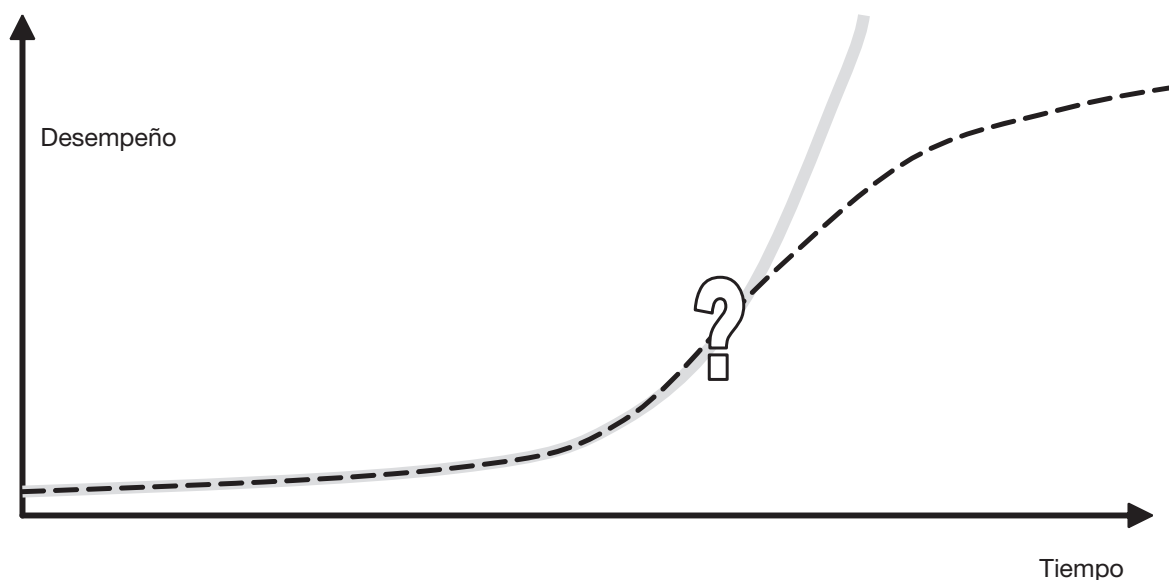
En otros sectores afirman que “la singularidad siempre está cerca” (Kelly, 2006), lo que invita a especular sobre nuestra percepción del tiempo. Por otro lado, también hay quienes se aferran a la ley natural de la función logística y aseguran que se aproxima un punto de inflexión, parecido a la conocida situación del crecimiento de la po-

blación o la producción petrolera (Modis, 2006). Las funciones logísticas por lo general surgen cuando escasean los recursos. En el gráfico 9.1, donde se encuentra el signo de interrogación es imposible predecir qué rumbo tomará esa función en el futuro.

Esto lleva a la pregunta: ¿Por qué debería desacelerarse de repente el progreso en los sistemas de TIC si se ha mantenido durante los paradigmas tecnológicos de los últimos siglos? Hay tres tipos de razones para explicar esa posible desaceleración. Dos están vinculadas a la escasez de recursos, y la tercera a los límites físicos de la información. Según el primer argumento, una eventual crisis de energía hará más lento todo tipo de progreso técnico. Esta suposición se basa en el actual paradigma de producción de energía que funciona con petróleo y carbón, pero no toma en cuenta que podría haber paradigmas alternativos en el futuro (biocombustibles y otros). De acuerdo con otro argumento, los actuales paradigmas de TIC llegarán a su fin y esto representará también el final de todas las innovaciones. Así, la ley de Moore sería el último paradigma de la computación y marcaría el final de los últimos seis cambios de paradigma desde la computación manual realizada con el ábaco. Según este argumento, nuestra generación pasará a la historia como la más brillante en términos de creatividad y las futuras generaciones no podrán mantenerse a nuestro nivel.⁴³

Gráfico 9.1

¿CRECIMIENTO EXPONENCIAL O FUNCIÓN LOGÍSTICA?



⁴³ La arrogancia y el egocentrismo son características humanas. Un ejemplo emblemático es la famosa recomendación de Charles Duell cuando era jefe de la dirección de patentes de Estados Unidos en 1899: propuso clausurar ese organismo porque, según afirmó, “todo lo que se pueda inventar ya ha sido inventado”.

Aunque le pese a nuestro ego, el capítulo sobre las tecnologías de computación más avanzadas demostrará que ya hay varias opciones que se están desarrollando, como los microprocesadores tridimensionales, la computación molecular y la computación cuántica. Por tanto, se puede esperar que el progreso técnico tendrá buenas posibilidades de evolucionar en futuros cambios de paradigma.

La tercera –y mucho más seria– razón de una eventual desaceleración del progreso técnico en los sistemas de TIC son las posibles limitaciones físicas en las operaciones informáticas. La interrogante se centra en los límites naturales de la capacidad para transmitir, procesar y almacenar información (Frank, 2002). Desde el tiempo de Einstein sabemos con certeza que existe al menos una limitación física para la información: la velocidad de la luz, que se establece como 299.792.458 m/s.⁴⁴ Esta es la velocidad máxima de movimiento para la “información pura”, por lo que un *bit* debe transmitirse por medios no físicos, como un fotón. Una serie de especulaciones ha surgido al aplicarse este límite de tiempo y espacio. En su trabajo de 1985 sobre las limitaciones físicas fundamentales de la computación, Bennet y Landauer (1985) del centro de investigación de IBM afirman: “Un cómputo, ejecutado por una máquina electrónica, un ábaco o un sistema biológico como el cerebro, es un proceso físico que está sujeto a las mismas interrogantes que corresponden a otros procesos físicos. Por ejemplo, ¿cuánta energía se debe usar para ejecutar un cómputo en particular? ¿cuánto se debe demorar? ¿qué tamaño debe tener el dispositivo que ejecuta el cómputo? En otras palabras, ¿cuáles son los límites físicos del procesamiento?” Ya en 1962 Bremermann combinó el $E=mc^2$ de Einstein con el principio de incertidumbre de Heisenberg y llegó a la conclusión de que “ningún sistema de procesamiento de datos, artificial o biológico, puede procesar más de (2×10^{47}) bits por segundo por gramo de su masa” (el límite de Bremermann) (Bremermann, 1962). Estas estimaciones se encuentran bajo discusión. Sin embargo, cualquier estudio de esta naturaleza llega a un resultado que es gigantesco y muy lejano de lo que es posible hoy día. Algunos autores de revistas reconocidas llegan a la conclusión que todo el Universo, con toda su materia, podría estar computando información constantemente (Lloyd y Ng, 2004).

Si bien Newton, Maxwell, Faraday y sus pares han hecho enormes aportes en la comprensión de la naturaleza de los objetos movibles y la electricidad –que rigen la tecnología de traslado y energía de cualquier tipo– las leyes fundamentales de la información todavía no son del todo claras, un hecho que nos deja como resultado un futuro incierto. No obstante, las trayectorias tecnológicas y los conceptos relacionados con ellas que se han expuesto deberían ayudarnos a sobrellevar esa incertidumbre.

⁴⁴ Este número podría haber sido diferente, pero en el mundo científico se acordó utilizar esta cifra extraña para que fuera comparable con las medidas tradicionales como el metro original (preservado en París).

TERCERA PARTE

EL ESTADO DEL ARTE DE LAS TIC

En esta parte del libro se presentan los sistemas más avanzados de TIC, además de una perspectiva y los temas conexos de mayor interés; de esta manera se demostrará que los diferentes sectores están estrechamente vinculados. Una característica común es la fusión de las diversas trayectorias tecnológicas, y la lógica subyacente se debe a que la “exaptación” de soluciones elaboradas externamente es más eficaz, barata y expedita que continuar con la resolución de problemas mediante procesos ya conocidos, que a menudo chocan con dificultades de escala o de costo.¹

Al afrontar la pregunta sobre cómo podría continuar el progreso técnico desde el actual límite de la frontera tecnológica, el análisis de las potenciales tecnologías simbióticas parece ser un buen punto de partida. En el primer capítulo se examinarán los campos cada vez más importantes de la nanotecnología y la biotecnología, que se están fusionando con los sistemas de TIC y cuya lógica será gradualmente incluida en la discusión de soluciones técnicas relacionadas. En el segundo capítulo se presentan los sensores y las interfaces con los que se capta y difunde la información, que se encaminan hacia soluciones más prácticas, entre ellas innovaciones materiales, estructurales y de sistemas en dispositivos ópticos, visuales, sonoros, aromáticos y cerebrales. De esta manera se avanza hacia la simbiosis entre humanos y computadoras. En el tercer capítulo se analiza cómo la convergencia de las TIC está cumpliendo con la tarea de fusionar las diferentes redes de transmisión de información en una sola infraestructura. El cuarto capítulo se centra en la computación y está dividido en dos partes. Primero se analizan las innovaciones de *hardware*; el final próximo de la ley de Moore

¹ El término “exaptación” ha sido tomado de la teoría de evolución biológica, según la cual hay estructuras de un organismo que luego se desarrollan en otro contexto. Por ejemplo, las plumas de las aves primero tenían como fin regular la temperatura, y sólo millones de años después se comenzaron a utilizar para volar.

exige innovaciones estructurales y de sistemas, debido a que ya no continuará la larga trayectoria de aprendizaje a escala con el silicio. En la segunda parte se aborda la discusión sobre la elaboración de *software*; el concepto de inteligencia artificial ha evolucionado mucho desde la euforia inicial de los años ochenta y el llamado invierno de la inteligencia artificial en los noventa, hasta llegar a la industria multimillonaria actual. En el quinto capítulo se discute cómo se está descentralizando la tecnología de almacenamiento; en la actualidad se habla de sistemas de almacenamiento y una red de dispositivos de almacenamiento, en lugar de memorias individuales. El capítulo seis se refiere a un campo diferente en las tecnologías de la información y de las comunicaciones: las TIC biológicas. Con estas tecnologías se mejora la capacidad de procesamiento del cerebro mediante las denominadas drogas de la inteligencia (nootrópicos) o la ingeniería genética.

Este último capítulo amerita un comentario más extenso. Se decidió incluir este nuevo campo de investigación porque se ajusta a la descripción de tecnologías de la sociedad de la información. Como se ha presentado en la introducción de este libro, el desarrollo de las sociedades de la información y del conocimiento se caracteriza por el rápido progreso y la difusión masiva de tecnologías que se aplican para transmitir, procesar, almacenar e interoperar información. También se define una tecnología en el sentido schumpeteriano, como la solución que presenta una respuesta a las interrogantes planteadas en el respectivo paradigma por medio de una combinación específica de factores y métodos, con el fin de satisfacer las promesas fomentadas por las ideas e ideologías preponderantes. Esas necesidades pueden ser: cómo transmitir información de un lugar a otro, cómo almacenarla más rápidamente, o cómo aprender más mientras se procesa la información. Si se tienen en cuenta ambas definiciones, cualquier técnica referente a la medicina, los medicamentos o la ingeniería genética destinada a mejorar la inteligencia humana –como, por ejemplo, una mayor capacidad de memoria, concentración y atención– puede considerarse una TIC. Estas técnicas ofrecen soluciones a la necesidad actual de facilitar los procesos vinculados a la información y la comunicación y, además, los avances de la biotecnología transportan a las TIC a una nueva era. En esta era, con el progreso técnico no sólo se mejora el procesamiento artificial de la información, sino que se intenta mejorar el procesamiento biológico, lo que constituye una amplificación de la inteligencia humana *per se*.

10. MÁS ALLÁ DEL PARADIGMA DIGITAL: EL PARADIGMA DE LA NANO Y BIOTECNOLOGÍA

Según la teoría schumpeteriana, la próxima onda larga del estilo Kondratieff-Freeman-Pérez debe estar muy cercana. Siguiendo la lógica de la acumulación acelerada del conocimiento, cada onda dura menos tiempo a medida que los ciclos de innovación se hacen más cortos. La era digital predomina en la ciencia y la tecnología desde los años setenta, es decir, desde hace más de tres décadas. Freeman y Louçã (2001) aseveran que la era de la electricidad fue el eje del desarrollo socioeconómico durante unos 45 años (1895-1940) y la era del motor lo fue durante alrededor de 33 años (1940-1973).

Las opiniones confluyen cada vez más en que la nueva onda larga girará en torno a una variedad de ramas científicas en las que se desarrollan soluciones tecnológicas a nivel molecular, lo que incluye a las llamadas nanotecnología y biotecnología. En ambos campos se trabaja con moléculas, entre otras las moléculas del ácido desoxirribonucleico (ADN), que contiene el código genético. La ciencia molecular a escala nano representa el cuerpo de conocimiento que establece las bases para el desarrollo de tecnologías en las que se manipulan y controlan estructuras moleculares. La Sociedad Real² del gobierno británico define la nanociencia como el estudio de fenómenos a escalas atómicas, moleculares y macromoleculares, donde las propiedades difieren en forma significativa de aquellas a gran escala, la macroescala. En este sentido, de una u otra manera en ambos campos se trabaja a nivel molecular, aunque la mayoría de los experimentos de nanotecnología están enfocados en los materiales y los estudios de biotecnología en la manipulación de células vivas.

Como todos los campos nuevos de la ciencia, éstos también nacieron de las ideas de pensadores futuristas. Desde los años setenta, varios escritores de ciencia ficción, entre ellos Robert Heinlein e Ira Levin, introdujeron el tema de la genética en sus obras, especialmente el aspecto de la clonación, como por ejemplo el conocido ejército de clones de la “Guerra de las galaxias”. Ya en este siglo, en 2003, Michael Crichton publica *Presa*, una novela basada en los avances de la ciencia y la tecnología, en el que las nanotecnologías escapan al control humano y se transforman en una amenaza

² Véase <http://www.nanotec.org.uk/>

para nuestra supervivencia, al convertirnos prácticamente en presas de letales enjambres de nanopartículas. Como en todos los casos en que se gesta un paradigma, las ideas y las visiones impulsan el nacimiento de nuevas tecnologías y hoy día ya existen industrias multimillonarias en las que se trabaja sobre la base de la genética y la nanociencia.

En este capítulo se revisan los conceptos básicos de esas tecnologías, cuya utilidad incluye los ámbitos de la alimentación, la salud y el medio ambiente. Para los efectos de este libro, es de particular interés la relevancia de estas tecnologías en el mejoramiento de los procesos vinculados a la información y la comunicación. Como el paradigma molecular influye en las trayectorias evolutivas del desarrollo de las TIC, estos conceptos aparecen con frecuencia en los capítulos en los que se abordan las TIC más avanzadas. En el último capítulo de esta parte del libro se volverá a tratar la biotecnología más en detalle. A continuación se presentan algunos conceptos básicos.

a. Nanotecnología³

La palabra nanotecnología se utiliza frecuentemente para definir las ciencias y técnicas que se aplican a nanoescala, es decir, medidas extremadamente pequeñas –nano– que permiten trabajar y manipular la materia a escala de átomos y moléculas. Esta nueva tecnología ofrece la posibilidad de fabricar materiales y máquinas con control y precisión, a partir del reordenamiento de moléculas y átomos. La materia prima de la nanotecnología son los elementos de la tabla periódica de química, a partir de los cuales todo se puede constituir. La nanotecnología promete beneficios de todo tipo, desde aplicaciones médicas, ascensores espaciales, nuevas técnicas de construcción y soluciones eficientes a los problemas ambientales, hasta asombrosas aplicaciones en las TIC, que es el sector de nuestro interés. Las aplicaciones de la nanotecnología en las TIC están cada vez más presentes en las cuatro funciones básicas: interoperar, transmitir, almacenar y procesar información, siendo este último el campo más citado, dado que tradicionalmente se ha buscado reducir el tamaño de los microprocesadores hasta llegar al mínimo, a lo infinitamente pequeño que requieren las tecnologías atómicas y moleculares. A continuación se presentarán diferentes aplicaciones y TIC que no podrían existir sin la aplicación del concepto de nanotecnología.

La nanotecnología y la nanociencia apuntan a la inmensidad en lo mínimo. Ordenados de una cierta manera, los átomos forman el suelo, el aire y el agua; ordenados de otra manera, constituyen manzanas, naranjas o teléfonos. Si reubicáramos los átomos del grafito de una mina de lápiz podríamos obtener diamantes, y esos mismos átomos de carbono reubicados podrían generar nanotubos de carbono más resistentes y livianos que el acero. El objetivo es utilizar nanomáquinas para construir productos mucho mejores, más económicos y no contaminantes. En este terreno se están desarrollando máquinas moleculares, que son controladas por computadoras más pe-

³ Esta sección ha sido escrita por Osvaldo Cairó, del Departamento Académico de Computación del Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM).

queñas que una partícula de polvo y –al trabajar con átomos– capaces de inspeccionar y manipular la estructura de la materia.

El padre de la nanotecnología es, indudablemente, el Premio Nobel Richard Feynman,⁴ quien fue el primero en concebirla mentalmente y hacer referencia a ella en 1962 durante la conferencia titulada “There’s Plenty of Room at the Bottom” (Queda bastante espacio en el fondo) que brindó en el Instituto de Tecnología de California –Caltech– (Feynman, 1992). Feynman afirmó que la manipulación átomo por átomo no violaba ninguna de las leyes de la física, y que si bien en ese momento no se podía llevar a cabo, era porque los científicos todavía no tenían el instrumental adecuado.

Feynman comenzó su ponencia con la pregunta: “*Why cannot we write the entire 24 volumes of the Encyclopedia Britannica on the head of a pin?*” (¿Por qué no se puede escribir el contenido de los 24 volúmenes de la Enciclopedia Británica en la cabeza de un alfiler?). La cabeza de un alfiler mide 1,58 milímetros de diámetro, y si aumentamos su diámetro 25.000 veces, el área de la cabeza será similar al de todas las páginas de la Enciclopedia Británica –24 tomos, de aproximadamente 820 páginas cada uno–. Por tanto, lo “único” que hay que conseguir es reducir 25.000 veces las dimensiones de las letras de la enciclopedia; la pregunta fue si esto sería posible. El poder de resolución del ojo humano es de aproximadamente 0,21 milímetros, que es el tamaño de cualquiera de los puntos que forman las ilustraciones en blanco y negro de la enciclopedia. Cuando uno de esos puntos se reduce 25.000 veces, tiene todavía 80 ángstroms –la diezmillonésima parte de un milímetro, 10^{-10}m – de diámetro, similar a 32 átomos de un metal común. En otras palabras, cada punto podría todavía contener en su interior unos mil átomos. Dado que cada punto se puede ajustar fácilmente al requerido por el fotograbado, entonces no debería haber duda alguna de que la Enciclopedia Británica podría caber en la cabeza de un alfiler.

La palabra nanotecnología fue acuñada por el investigador japonés Norio Taniguchi (1974), quien definió este campo como una tecnología de producción que permite alcanzar alta precisión y dimensiones del orden de un nanómetro (nm) –la millonésima parte de un milímetro, 10^{-9}m –. Taniguchi consideró que la nanotecnología consiste principalmente en el proceso de separación, consolidación y deformación de materiales por un átomo o una molécula. Más recientemente, el responsable de la iniciativa nacional de nanotecnología en Estados Unidos, Mihail Roco (2005) la definió como la investigación y el desarrollo tecnológicos a nivel atómico, molecular y supramolecular destinados a proporcionar un entendimiento fundamental de los fenómenos y los materiales en nanoescala, para poder así crear y usar estructuras, dispositivos y sistemas que presentan nuevas propiedades y funciones debido a su tamaño pequeño o intermedio.

⁴ Richard Feynman (1918-1988), físico estadounidense, es considerado como uno de los científicos más importantes de su país en el siglo XX. Su trabajo en electrodinámica cuántica le valió el Premio Nobel de Física en 1965.

1. Comportamiento de la materia a nanoescala

Nano es un prefijo que indica una medida, no un objeto. A diferencia de la biotecnología, donde bio indica que se manipulan las células vivas, la nanotecnología hace referencia a una escala. Un nanómetro (nm) representa la millonésima parte de un milímetro, 1×10^{-9} metros, en comparación con un kilómetro (1×10^3 metros), un centímetro (1×10^{-2} metros), un milímetro (1×10^{-3} metros) o un micrómetro (1×10^{-6} metros). El nanómetro se utiliza para medir la longitud de onda de la radiación ultravioleta, radiación infrarroja y la luz, además de materiales de muy escasas dimensiones. El 10^{-12} nos sitúa en el ámbito del núcleo de un átomo, en cambio 10^{12} (un terámetro) está en la escala de todo el sistema solar. Para entenderlo mejor, señala Ernesto Calvo de la Universidad de Buenos Aires, un nanómetro es a un centímetro, lo que la huella de un pie es al ancho del océano Atlántico. Este se puede comprender mejor cuando consideramos que un átomo tiene entre 0,1 y 0,2 nanómetros y en un nanómetro caben alrededor de 10 átomos de hidrógeno y una gota de agua contiene más de mil trillones de átomos. Un átomo es aproximadamente la diezmilésima parte del tamaño de una bacteria, y ésta es, aproximadamente, la diezmilésima parte del tamaño de un mosquito.

El tamaño marca la diferencia

Cuando se manipula y controla la materia a escalas tan pequeñas –nanométricas–, las propiedades físicas y químicas cambian, lo cual genera fenómenos diferentes; por ejemplo, propiedades cuánticas como las del principio de indeterminación de Heisenberg,⁵ termodinámicas, o propiedades totalmente nuevas. Esto implica, entre otras cosas, que los cambios de geometría y tamaño en un sistema o la alteración de posiciones de los átomos y moléculas aparentemente imperceptibles a nanoescala se traducen en cambios de las propiedades macroscópicas del objeto en cuestión. La nanociencia es justamente distinta a las otras ciencias porque aquellas propiedades que no se pueden observar a escala macroscópica adquieren importancia a escalas nanométricas. En vez de estudiar materiales en su conjunto, los científicos investigan con átomos y moléculas individuales. Al aprender más sobre las propiedades de las moléculas, es posible unirlos de forma muy bien definida para crear nuevos materiales y sistemas novedosos con propiedades únicas.

La conductividad eléctrica, el color, la resistencia, la reactividad y la elasticidad, se comportan de manera diferente que cuando lo hacen en los mismos elementos a escala mayor. El oro, por ejemplo, es de color amarillo, pero las nanopartículas que lo componen son de color rojo. El grupo de nanopartículas de oro mayores a 30 nm es de color azul. Si cortamos un papel de aluminio en múltiples pedazos, cada fragmento seguirá siendo aluminio, pero si los seguimos cortando y llegamos a escalas de 20

⁵ El principio de indeterminación de Heisenberg o efecto cuántico imposibilita conocer con exactitud, arbitraria y simultáneamente, la posición y el momento de una partícula.

o 30 nm, entonces puede explotar. En la actualidad se está considerando incorporar nanoaluminio al combustible de los cohetes espaciales, por la potencia que les imprimiría. También se han desarrollado aleaciones de nanoaluminio, denominadas gigas, porque su resistencia a la tensión está en el rango de un gigapascal.

En la nanotecnología se observa que los comportamientos de los organismos individuales de una manera u otra determinan la conducta colectiva a una escala mayor y, por tanto, el comportamiento de la misma sociedad. Según este punto de vista jerárquico, independientemente de que sea reduccionista u holística, cada sustancia, así como cada sistema cultural o biológico, es resultado directo o indirecto de los procesos moleculares que operan en diferentes niveles (Grupo ETC, 2003).

Enfoques top-down y bottom-up

El primer enfoque, *top-down* –de arriba hacia abajo, de lo grande hacia lo pequeño– está asociado a los conceptos de microelectrónica y miniaturización, y prevaleció hasta mediados de la década de los ochenta (Franks, 1987). El segundo enfoque, *bottom-up* –de abajo hacia arriba, desde lo ínfimo, desde átomos y moléculas hasta lo grande– irrumpió en 1986 cuando Drexler (1986) sugiere construir objetos más grandes a partir de sus componentes atómicos y moleculares. En la actualidad ambos enfoques coexisten, pero indudablemente predomina el segundo, el de construir objetos o dispositivos mediante su ensamblado a partir de átomos y moléculas.

El enfoque *top-down* se remonta prácticamente al invento del dispositivo que dio origen al campo de la electrónica de estado sólido y revolucionó el mundo de las comunicaciones: el transistor. John Bardee,⁶ Walter Brattain y William Shockley descubrieron en los laboratorios Bell los efectos del transistor –transferencia de resistencia– y desarrollaron el primer dispositivo en 1947. El transistor marcó el advenimiento de elementos lógicos más pequeños, rápidos y versátiles de lo que permitían las máquinas con válvulas. Unos años más tarde, en 1958, Jack Kilby⁷ desarrolló en la empresa Texas Instruments el primer circuito que integraba seis transistores en una misma base conductora –un *chip*–. La electrónica de estado sólido se estaba convirtiendo en el motor que impulsaría el desarrollo tecnológico de la humanidad. En 1971, se desarrolló en la compañía Intel el primer microprocesador –conjunto de circuitos electrónicos altamente integrado para cálculo y control computacional–, al cual se denominó Intel 4004. Se comenzaba a hablar de miniaturización, de microtecnología, de micrómetros –unidad de longitud equivalente a una millonésima parte de un metro, 1×10^{-6} m–. Se iniciaba la vertiginosa carrera por la miniaturización que la microelectrónica ha mantenido durante casi cuatro décadas. En la actualidad, Intel imprime cir-

⁶ El invento del transistor hizo acreedores a John Bardee, Walter Brattain y William Shockley del Premio Nobel de Física en 1956. Para observar la patente, el lector puede ingresar a la página: www.bellsystemmemorial.com/pdf/02569347.pdf

⁷ En el año 2000, Kilby fue galardonado con el Premio Nobel de Física por la contribución de su invento al desarrollo de la *tecnología de la información*.

cuitos de aproximadamente 50 nm, y los representantes de la empresa señalan que se está trabajando sobre una nueva técnica, litografía ultravioleta extrema, EUV –por su sigla en inglés–, (Zeiss, 2005; Seitz y otros, 2004) que permitirá imprimir circuitos con resoluciones menores a los 30 nm, en preparación para la resolución de 15 nm que será requerida cuando la litografía EUV entre en producción, en el año 2009.

El enfoque *top-down*, de reducción de tamaño, de miniaturización, de micrómetros a nanómetros, fue el que predominó hasta mediados de la década de los ochenta, y el que sostuvieron entre otros Feynman y Taniguchi en temas de nanotecnología. Si en nanotecnología Feynman fue el filósofo, Drexler (1986), indudablemente, fue el profeta. En 1986 publicó el libro más estimulante sobre esta nueva disciplina, *Engines of Creation: the Coming Age of Nanotechnology* (Motores de creación: la próxima era de la nanotecnología). Drexler propuso un concepto alternativo: construir objetos más grandes a partir de sus componentes atómicos y moleculares. Este enfoque, conocido más tarde como *bottom-up*, es completamente diferente al anterior, *top-down*, y más cercano a la percepción que se tiene hoy día de la nanotecnología o tecnología molecular.⁸ Drexler sugiere utilizar herramientas potentes como el microscopio de efecto túnel o el microscopio de fuerza atómica. Se comienza con una estructura nanométrica como una molécula y mediante un proceso de montaje o autoensamblado, se crea una estructura mayor. Este enfoque permite que la materia se pueda controlar de manera muy precisa. Se estima que las fábricas moleculares reales, nanomáquinas, podrán ser capaces de crear prácticamente cualquier material mediante procesos de montaje exponencial de átomos y moléculas, que serán controlados con precisión.

Un ejemplo del enfoque *bottom-up* lo representa la litografía DPN (Ginger, Zhang y Mirkin, 2004), que facilita fabricar nanoestructuras de polímeros, metales o semiconductores, partiendo de los componentes más pequeños. En 2006, varios investigadores desarrollaron una nueva versión que denominaron nanolitografía térmica *dip-pen*, y que se puede usar para grabar directamente en una amplia gama de materiales ópticos y electrónicos, para la fabricación de circuitos nanoeléctricos, para analizar muestras biológicas diminutas o para imprimir características extremadamente pequeñas.

Un ensamblaje multidisciplinario

La característica fundamental de la nanotecnología es que constituye un ensamblaje multidisciplinario de varios campos de las ciencias naturales que están altamente especializados. La ciencia ha alcanzado en esta tecnología un punto en el que las fronteras que separan diferentes disciplinas se han comenzado a diluir. La química, la bioquímica, la biología molecular, la física cuántica, la ingeniería mecánica, la ingeniería

⁸ Drexler además introdujo en este libro el término *gray goo*, para describir lo que sucedería hipotéticamente si una nanomáquina molecular se replicara a sí misma, se saliera de control y consumiera toda la materia viviente de la Tierra.

eléctrica, la microelectrónica, la ciencia de los materiales y la informática son algunas de las disciplinas que confluyen con la nanotecnología. Es cierto que cada campo tiene una aproximación diferente al mundo de la nanoescala, pero todos son necesarios. El entrecruzamiento y la sinergia entre estas disciplinas son fundamentales para cualquier desarrollo que se realice en el terreno de lo ínfimamente pequeño.

Schummer (2004) señala que un análisis realizado sobre las publicaciones en las revistas más importantes de nanotecnología, *Nanotechnology* y *Nano Letters*, muestra que el mayor número de contribuciones proviene de los siguientes campos: a) física, un 35%; b) química, el 28%; c) ciencia de los materiales, el 12%, y d) ingeniería eléctrica, un 10%. Es importante observar también que una revista multidisciplinaria no necesariamente implica contribuciones interdisciplinarias, ya que desde disciplinas diferentes se pueden hacer aportes distintos. Schummer estima que, en promedio, cada artículo sobre nanotecnología incluye 4,5 autores que provienen de 2 o 3 instituciones diferentes. El estudio también muestra que el hecho de que sea interinstitucional o multidisciplinario no implica que sea interdisciplinario. Las contribuciones interdisciplinarias, las que realmente permiten el entrecruzamiento y motivan la sinergia, son realmente mínimas.

2. Aplicaciones de la nanotecnología para las TIC

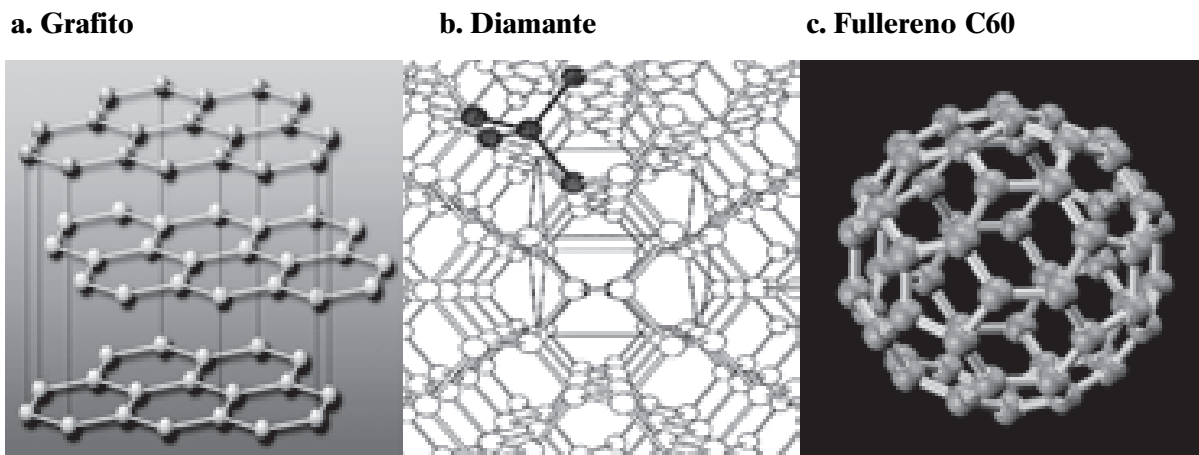
Por su naturaleza multidisciplinaria, la nanotecnología puede ser utilizada en muchos campos relacionados con la información y la comunicación. No solamente nació con la ambición de escribir la Enciclopedia Británica en la cabeza de un alfiler, sino con el interés de mejorar los microprocesadores, pero está en pleno proceso de impulsar a las TIC hacia una nueva fase de su desarrollo.

Fullerenos y nanotubos de carbono

Los nanotubos de carbono fueron descubiertos por Sumio Iijima en Japón en 1991, mientras realizaba un experimento para producir fullerenos. Los nanotubos de carbono son una consecuencia directa de las investigaciones sobre el fullereno C₆₀, descubierto unos años antes por Harold Kroto, Richard Smalley y Robert Curl, un logro que los convirtió en acreedores del Premio Nobel de Química en 1996 (Kroto, Allaf y Balm, 1991; Kroto y otros, 1985). Iijima, un microscopista de la compañía japonesa NEC que había estudiado durante muchos años las fibras del carbono a escala atómica, analizó la publicación sobre el fullereno C₆₀, y al aplicar una descarga de arco entre electrodos de grafito encontró filamentos de carbono cristalizado, que tenían unos pocos nanómetros de diámetro y unos pocos micrones en longitud: nanotubos de carbono de 3 a 30 nm de diámetro. El descubrimiento de los nanotubos de carbono abrió una nueva era en la ciencia de los materiales.

Los fullerenos son moléculas formadas exclusivamente por átomos de carbono. Estas moléculas se hicieron muy populares, tanto por su belleza estructural, resistencia térmica y superconductividad, así como por su versatilidad para la síntesis de nuevos compuestos, ya que se presentan en forma de esferas, elipsoides o cilindros. Es

Figura 10.1
FORMAS ALOTRÓPICAS DEL CARBONO⁹



importante señalar que todos los materiales de carbono están compuestos de átomos de carbono. Sin embargo, dependiendo de la organización de los átomos en la estructura –su forma alotrópica–, los materiales pueden ser muy diferentes, tal como el grafito o el diamante (véase la figura 10.1).

Hechos de puro carbono, tan regulares y simétricos como los cristales, los nanotubos son macromoléculas cilíndricas de carbono con propiedades sobresalientes, que los hacen potencialmente útiles para las industrias electrónica, óptica, automovilística, telefónica y espacial, entre otras; además, han atraído inmediatamente el interés de investigadores de los campos de la física, química y de la ciencia de los materiales. Es importante señalar que se denomina nanotubo a cualquier estructura tubular obtenida de silicio, nitruro de boro o carbono, pero generalmente se utiliza este término para los que provienen del carbono. El diámetro de un nanotubo puede variar desde los 0,5 nm hasta los 100 nm, y su longitud puede ser de varios milímetros. Los nanotubos de carbono representan el primer producto de la nanotecnología molecular, la posición precisa de los átomos para crear nanomáquinas útiles.

Los multicapa –*multiple walled nanotubes*, MWNT– consisten de múltiples láminas de grafito enrolladas sobre sí mismas, tubos concéntricos, similar a la forma de las muñecas rusas –unas dentro de otras. Tienen un diámetro aproximado de 2 nm a 100 nm y una longitud de hasta 500 nm. Los nanotubos monocapa, –*single walled nanotubes*, SWNT–, fueron desarrollados en 1993, por el mismo Iijima y Donald Bethune de IBM, en forma independiente. Estos están formados por una única capa de átomos de carbono, tienen un diámetro aproximado de 1 nm y una longitud de varios milíme-

⁹ a. grafito: <http://www.scifun.ed.ac.uk/card/images/flakes/graphite-layers.jpg>,
b. diamante: <http://www.forum2.org/gaal/lj/diamond-structure.jpg>, y
c. fullereno C₆₀: <http://sbchem.sunysb.edu/msl/c60f.jpg>

Figura 10.2
NANOTUBOS DE CARBONO¹⁰



tros; recientemente se han producido nanotubos monocapa hasta de algunos centímetros (Zhu y otros, 2002) (véase la figura 10.2). Los nanotubos de carbono son sistemas ligeros, huecos y porosos que tienen alta resistencia mecánica, alta resistencia a la tracción y enorme elasticidad. Un nanotubo es de 10 a 100 veces más fuerte que el acero –por peso de unidad–, más liviano que el aluminio, cientos de veces más conductor de electricidad que un cable de cobre, la resistencia a la tracción es 10 veces superior a la de los hilos de la telaraña, y su conductividad térmica es comparable a la del cristal de un diamante. Además, dependiendo del diámetro del tubo y la forma en que éste se enrolla, se puede comportar electrónicamente como conductor, semiconductor o aislante. A esta versatilidad se añade el hecho de que se pueden encapsular metales y gases en su interior.

Nanopartículas, puntos cuánticos y nanocristales

El término nanopartículas se utiliza también para hacer referencia a los puntos cuánticos. Aunque esta referencia no es incorrecta, muchos investigadores señalan que los puntos cuánticos tienen mucho más valor por sus propiedades de la mecánica cuántica que por su tamaño a nanoescala. Finalmente, cabe mencionar que las nanopartículas por lo general son cristalinas, razón por la cual muchas veces reciben el nombre de nanocristales, aunque no es lo mismo un nanocristal que un material nanocristalino.

¹⁰ Las imágenes de los nanotubos de carbono fueron tomadas de las siguientes páginas: <http://www.surf.nuqe.nagoya-u.ac.jp/nanotubes/omake/nanotubes/MWNT.jpg> y <http://www.surf.nuqe.nagoya-u.ac.jp/nanotubes/omake/nanotubes/MWNT.jpg>

Cuadro10.1
PROPIEDADES DE LOS NANOTUBOS DE CARBONO

Propiedades	Nanotubo	Comparación
Tamaño	0,6 a 1,8 nm de diámetro.	La litografía de haz electrónico puede crear líneas de 50 nm de ancho.
Densidad	1,33 a 1,40 g/cm ³	El aluminio tiene una densidad de 2,7 g/cm ³ .
Resistencia a la tracción	45.000 millones de pascales.	Las aleaciones de acero de alta resistencia se rompen aproximadamente a 2.000 millones de pascales.
Elasticidad	Pueden doblarse a grandes ángulos y vuelven a su estado original sin daño.	Los metales y las fibras de carbono se fracturan ante similares esfuerzos.
Capacidad de transporte de corriente	Estimada en mil millones de amperes por cm ² .	Los alambres de cobre se funden a aproximadamente un millón de amperes por cm ² .
Emisión de campo	Pueden activar fósforos con 1 a 3 voltios si los electrodos están espaciados una micra.	Las puntas de molibdeno requieren campos de 50 a 100 voltios/m y tienen tiempos de vida muy limitados.
Transmisión de calor	Se estima que es tan alta como 6.000 vatios (W) por metro por kelvin (mK), a temperatura ambiente.	El diamante casi puro transmite 3.320 W/mK.
Estabilidad térmica	Estable aun a 2.800°C en el vacío, y 750°C en aire.	Los alambres metálicos en <i>microchips</i> se funden entre 600 y 1.000°C.

Este último contiene elementos cristalinos a nanoescala pero no necesariamente nanocristales separados, objetos de este estudio.

Una nanopartícula se puede definir como una partícula microscópica, más grande que los átomos y moléculas, similar al volumen de las proteínas en el cuerpo, y cuyo tamaño debe ser menor a 100 nm. Cuanto más pequeña es la nanopartícula, más exhibe el comportamiento mecánico cuántico. Si el tamaño de la nanopartícula fuera un poco mayor a 100 nm, entonces se debería considerar una micropartícula. En la actualidad, las nanopartículas junto con los nanotubos de carbono representan las

aplicaciones más inmediatas de la nanotecnología, básicamente por el hecho de que son fáciles de hacer y robustos en cualquier entorno. Las nanopartículas son de gran interés científico porque representan un puente entre los materiales y su estructura molecular o atómica. A nanoescala se pueden observar propiedades como confinamiento cuántico en partículas semiconductoras o supermagnetismo en materiales magnéticos, que son muy difíciles de observar a escala macroscópica.

Los puntos cuánticos son nanopartículas que se forman a partir de material semiconductor y cuyo tamaño se aproxima a 10 nm. Se denominan así porque su tamaño nanométrico provoca un confinamiento cuántico de los electrones en su estructura. Dado que tienen un discreto nivel de energía –similar a un átomo–, reciben también el nombre de átomos artificiales. Los puntos cuánticos se conocen también con el nombre de transistor de un solo electrón, *bit* cuántico, *qubit* o también como nanocristales que contienen entre 1.000 y 100.000 átomos y exhiben inusuales efectos cuánticos, como fluorescencia prolongada. Se considera que el punto cuántico tiene una mayor flexibilidad que otros materiales fluorescentes, y por tanto es extremadamente útil tanto como marcador biológico de actividad celular, como en construcciones a nanoescala de aplicaciones computacionales donde la luz se utiliza para procesar la información.

Hasta la fecha, los puntos cuánticos han sido reconocidos por su capacidad para producir una docena de distintos colores de luz, simplemente variando el tamaño de los nanocristales individuales. Sin embargo, químicos de la Universidad Vanderbilt de Estados Unidos (Bowers, McBride y Rosenthal, 2005) han descubierto una forma de hacer que espontáneamente los puntos cuánticos produzcan un amplio espectro de luz blanca. De manera similar, el grupo de investigación conducido por Lauren Rowher desarrolló el primer dispositivo de estado sólido que utiliza puntos cuánticos y genera luz blanca. El método consiste en encapsular puntos cuánticos semiconductores y adaptar sus superficies de manera que emitan luz visible en forma eficiente cuando son estimulados por diodos LED, emisores de luz ultravioleta. Los puntos cuánticos absorben dicha luz de forma intensa y la reemiten en el rango visible, con un color determinado por su tamaño y química superficial. Este descubrimiento, indudablemente, representa una revolución en todo lo que es iluminación, ya que abre la posibilidad real de que estas nanopartículas se conviertan en los sucesores de las bombillas de luz. Con puntos cuánticos de materiales semiconductores se pueden fabricar, además, diodos láser emisores de luz más eficientes que los usados en lectores de CD, códigos de barra, y otras aplicaciones.

*b. Biotecnología y bioinformática*¹¹

Los orígenes de la biología anteceden a los filósofos griegos. La biología moderna, sin embargo, es muchísimo más reciente; surge doscientos años atrás y consta de cuatro

¹¹ Esta sección fue elaborada por Ángel Kuri del Departamento Académico de Computación del Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM) y Osvaldo Cairó, del Departamento Académico de Computación del Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM).

principios fundamentales: *la teoría celular, el principio de evolución, la teoría genética* y la *homeostasis*. La *teoría celular* señala que todos los organismos vivos están compuestos por al menos una célula y que la célula es la unidad básica de función en todos los organismos. El *principio de evolución* representa el proceso continuo de transformación de las especies a través de cambios producidos en sucesivas generaciones. Este cambio puede ser afectado por una cantidad de diversos mecanismos: *selección natural, deriva genética, mutación y migración* –flujo genético. Por su amplitud conceptual la *teoría de la evolución* se convierte en la piedra angular de la biología (Báez, 2005). La genética, por otra parte, es un campo de la biología en el que se estudia y se trata de entender la forma en que los genes son transmitidos de una generación a la siguiente, y cómo se efectúa el desarrollo de las características que controlan esos genes. Cabe señalar que en los organismos vivos la información genética reside en los cromosomas. Finalmente, la homeostasis es un proceso fisiológico que permite a los organismos mantener su medio ambiente interno, a pesar del medio ambiente externo en el que viven. La biología se tuvo que restringir a la descripción de los fenómenos de los seres vivos sin tener para ellos una explicación de principios básicos, hasta mediados del siglo anterior cuando Watson y Crick (1953) descifraron la estructura del ácido desoxirribonucleico, ADN, y sentaron las bases de la genética moderna. El papel del ADN es el de almacenar y procesar información, el código genético. Así, no sorprende que pueda ser utilizado para otras tareas informáticas y comunicacionales, y el mundo científico lo está utilizando para resolver diversas operaciones informáticas.

La interacción de las ciencias de la información y de la comunicación y sus soluciones tecnológicas con la biología ha dado origen a un mutuo enriquecimiento, y la formalización de las ciencias biológicas se ha visto impulsada por la disciplina computacional. Actualmente es posible efectuar análisis biológicos cuantitativos de complejidad impensada unos pocos años atrás. En el sentido inverso, los notables avances de la biología molecular han permitido visualizar la aplicación de técnicas biológicas a la solución de problemas de tipo matemático y computacional. Así, la biología se convierte en una posible alternativa tecnológica orgánica para la implementación de herramientas computacionales, y las características de tales herramientas pueden complementar las clásicas tecnologías electrónicas inorgánicas, fundamentadas en el diseño de componentes fabricados sobre la base del silicio.

1. Bioinformática y biotecnología

La bioinformática se refiere a la creación y desarrollo de algoritmos computacionales y técnicas estadísticas, mediante las cuales se puedan resolver formal y prácticamente problemas inspirados en el manejo y análisis de datos biológicos. La *biotecnología*, por otra parte, es una aplicación tecnológica en la que se utilizan sistemas biológicos y organismos vivos o sus derivados, para la creación o modificación de productos o procesos para usos específicos.

En la actualidad existen múltiples definiciones sobre el concepto de la bioinformática, que se utiliza en diferentes ámbitos y con propósitos muy diferentes. Los biólogos, los expertos en informática y los biotecnólogos tienen enfoques sustancialmen-

te diferentes sobre esta disciplina incipiente. La mayoría de las partes interesadas favorece el uso de métodos informáticos para entender mejor grandes cantidades de datos biológicos. El departamento de biología de la Universidad Georgia Tech, en Estados Unidos,¹² la define como “la integración de métodos matemáticos, computacionales y estadísticos para analizar datos biológicos, bioquímicos y biofísicos”. El *National Center for Biotechnology Information* (Centro Nacional para la Información Biotecnológica), la define como “un campo de la ciencia en el cual confluyen varias disciplinas, como biología, computación y tecnologías de la información. El fin ulterior de este campo es facilitar el descubrimiento de nuevas ideas biológicas así como crear perspectivas globales a partir de las cuales se puedan discernir principios unificadores en la biología”. Otros sectores van más allá del uso de bases de datos y *software* en el análisis y visualización de información sobre la vida; dan vuelta el concepto y adhieren al uso de técnicas derivadas de la biología, como las redes neuronales y los algoritmos genéticos, y la introducción de componentes orgánicos, para avanzar en la ciencia computacional, como por ejemplo la computación con ADN.

La biotecnología, en una forma u otra, ha sido utilizada prácticamente desde tiempos prehistóricos. Cuando los primeros humanos se dieron cuenta que la fermentación del jugo de frutas producía vino, que la leche se podía convertir en queso, o que la cerveza se obtenía de la mezcla fermentada de malta y lúpulos, en esos momentos comenzaron los estudios sobre biotecnología. En la actualidad, como ocurre con la bioinformática, el concepto tiene interpretaciones diferentes. Algunos sostienen que la biotecnología tiene que ver con la creación de nuevos tipos de animales, otros lo ven como la fuente para la elaboración de nuevos medicamentos para humanos, otros consideran que representa la posibilidad de diseñar cosechas más nutritivas y resistentes para una población mundial cada vez más numerosa. En el Convenio sobre la Diversidad Biológica, que fue adoptado durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo en 1992, también conocida como la Cumbre de la Tierra, se define la biotecnología como “toda aplicación tecnológica que utilice sistemas biológicos y organismos vivos o sus derivados para la creación o modificación de productos o procesos para usos específicos” (CNUMAD, 1992).

Por convención científica, la biotecnología se conoce también por colores. La biotecnología roja se aplica a procesos médicos –diseño de organismos para producir antibióticos–; la biotecnología blanca o gris se aplica en procesos industriales –el uso de enzimas como catalíticos industriales para producir químicos–, y la biotecnología verde se aplica en los procesos de la agricultura –diseño de plantas transgénicas que pueden crecer en entornos poco favorables. La biotecnología tiene aplicaciones en diversas grandes áreas industriales, como la salud, alimentación, agricultura y producción de cosechas, medio ambiente y uso de la producción agropecuaria para productos no alimenticios, como por ejemplo plásticos biodegradables o biocombustibles. Si bien estas aplicaciones son ampliamente conocidas, la biotecnología también con-

¹² Véase: <http://www.biology.gatech.edu/graduate-programs/bioinformatics/new/whatis.php>

tribuye para avanzar en las tecnologías de la información y de las comunicaciones, que es el tema central de este libro.

Desenredando la información de la genómica y de la proteómica

La genómica es la rama de la biología que se encarga del estudio de los genomas, es decir, el conjunto de información genética –ADN– de un organismo. Tiene como objetivo catalogar todos los genes de un organismo, estudiar la organización, estructura y función de cada uno de ellos, los mecanismos involucrados en la regulación de la expresión y el modo en que unos genes interactúan con otros. La genómica ha tenido un avance espectacular en los últimos años debido, principalmente, a las técnicas avanzadas de secuenciación, a la bioinformática y a las técnicas cada vez más sofisticadas para realizar análisis de genomas completos. A la fecha se han estudiado ampliamente más de 50 genomas y muchos más están en proceso de análisis. El interés fundamental en las largas secuencias genómicas que residen en el ADN radica en la identificación de los genes que se encuentran en ellas. Las herramientas bioinformáticas existentes en línea permiten hacer minería de datos de secuencias de dominio público. Sin embargo, la aparente simplicidad de un genoma puede ser engañosa. Hasta hace poco tiempo el genoma humano se describía como un 98% de ADN “basura”. La obtención de genomas completos nos permite detectar nuevos patrones y conexiones que antes era imposible visualizar. Los genes nacen de los genomas y los orígenes de los genes pueden estar en especies evolutivamente distantes. Los científicos esperan utilizar las secuencias para desarrollar nuevas formas de diagnosticar, prevenir y tratar enfermedades.

Uno de los programas indudablemente más interesantes que se han desarrollado en el área de genómica, es el denominado Proyecto del Genoma Humano,¹³ PGH (IHGSC, 2004). En sus inicios se estimaba que el PGH tendría una duración de más de 15 años. Sin embargo, el interés que despertó por la potencialidad que se deriva del conocimiento del genoma, condujo al desarrollo de nuevas técnicas –muchas de ellas fuertemente apoyadas en el tratamiento computacional de la información– que aceleraron el proceso de análisis y redundaron en que el proyecto se finalizara en diez años en lugar de los quince proyectados inicialmente.

La proteómica es la ciencia que se encarga del estudio del proteoma, es decir, se identifican todas las proteínas que fabrica una célula, un tejido o un organismo, se determina cómo interactúan dichas proteínas entre sí, y se encuentra una estructura tridimensional precisa de cada una de esas proteínas. El proteoma de un individuo puede tener una complejidad de dos o tres órdenes de magnitud superior a la del genoma.

En la proteómica se correlacionan las proteínas con sus genes y se estudia el conjunto completo de proteínas que se pueden obtener de un genoma. Si el ADN representa el plano de la vida, las proteínas representan los ladrillos y el cemento. De he-

¹³ Para obtener información detallada sobre el PGH consúltese: http://www.ornl.gov/sci/techresources/Human_Genome/home.shtml

cho, funcionan también como los tornillos y herramientas necesarias en el ensamblaje de una célula o un organismo y hacen también de constructores que llevan a cabo el trabajo del ensamble. Los genes proporcionan la información del individuo, pero el individuo en sí está constituido por sus proteínas. A diferencia de la mayoría de los programas de informática en los que existe una jerarquía bien definida, las interacciones proteicas no están jerarquizadas. Supongamos, por ejemplo, que la proteína A actúa como un mediador para la producción de la proteína B, y ésta, a su vez, regula la producción de la proteína C. En la estructura proteica es perfectamente plausible que la proteína C catalice la síntesis de la proteína inicial A. Debido a esta serie de interacciones heterárquicas, el análisis de la dinámica de las proteínas de un ser vivo es extremadamente complejo. Esta situación se hace más difícil aún porque las propiedades de una proteína dependen, básicamente, de su estructura terciaria (Beauchamp, 1985). Aunque es relativamente fácil determinar la estructura primaria de una proteína la determinación de su doblamiento en 3D es un problema realmente complejo y se requieren herramientas de análisis y de visualización informáticas avanzadas.

En el caso de la biología molecular, la relación entre la información codificada en las bases del ADN y las posibilidades de procesar información con los sistemas de TIC ha sido motivo de una explosión de investigaciones tendientes a analizar preguntas que hasta antes del descubrimiento de la analogía bioinformática no hubiesen tenido ningún sentido. Por ejemplo, ¿cómo se agregan los datos en el ADN?; ¿qué tan redundante es la información que se encuentra inmersa en las estructuras nucleares?; ¿de qué manera se afecta el metabolismo celular en caso de alteraciones estructurales de la información contenida en el genoma?; ¿qué patrones determinan la manera en la que las proteínas operan?; ¿es posible generalizar el comportamiento de un grupo de proteínas partiendo de las estructuras subyacentes?

2. La información en términos biológicos y químicos

La biología molecular ha mostrado que los procesos de funcionamiento de las células dependen de los procesos de almacenamiento de información en el núcleo de la célula –ADN– y de la ejecución de las órdenes almacenadas en estos vía secuencias –proteínas– de elementos de ejecución básicos –aminoácidos–.

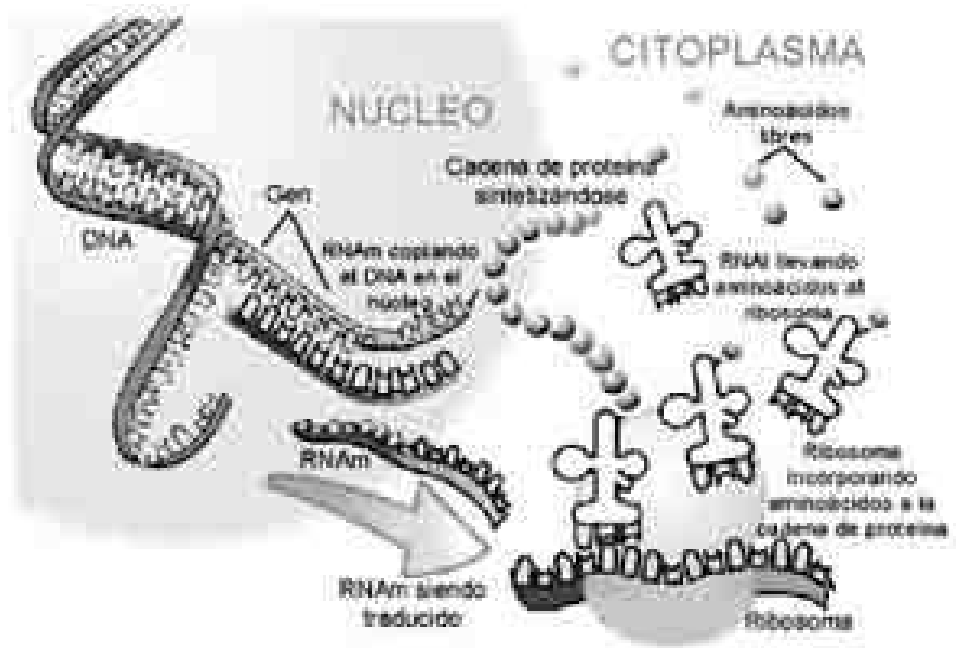
En términos biológicos y químicos, la información se encuentra almacenada en largas cadenas de estructuras químicamente estables y simples llamadas bases nitrogenadas. Los procesos evolutivos derivaron en estructuras orgánicas complejas –células– en cuyo centro –eucariontes– se encuentra el ADN –secuencia de bases nitrogenadas–. De todas las configuraciones estables análogas la evolución eligió un alfabeto con cuatro letras: adenina, citosina, guanina y timina, generalmente denotadas por las letras A, C, G y T, que conforman las letras del código genético. Cada una de estas bases forma, junto con un glúcido y un grupo fosfato, un nucleótido –hay cuatro nucleótidos diferentes–. El ADN y el ARN son polímeros formados por nucleótidos encadenados. La famosa contribución principal de Watson y Crick (1953) radica en la demostración de este hecho y en la descripción del detalle morfológico del ADN.

El siguiente paso conceptualmente importante consiste en la explicación del mecanismo a través del cual la información contenida en el ADN se convierte en una secuencia de comandos, que permite la regulación de los procesos metabólicos a nivel celular. Las bases se organizan en grupos de tres nucleótidos que forman una unidad funcional llamada codón. Como en cada cadena pueden aparecer cuatro nucleótidos diferentes, caben $4^3 = 64$ combinaciones de codones distintos. A cada codón le corresponde un único significado que será uno de los 20 aminoácidos de interés¹⁴ en 61 de los casos o una instrucción de final de traducción, en los tres casos restantes. La combinación de codones que se expresa en una secuencia lineal de nucleótidos, conforma cada *gen* necesario para producir la síntesis de una macromolécula con función celular específica. Durante el proceso de traducción –síntesis de proteína– el mensaje genético se lee de una cadena de ARNm –ARN mensajero–, colocando cada vez el aminoácido indicado por el siguiente codón según la regla que llamamos *código genético*. El proceso de traducción que se conoce con el nombre de síntesis de proteínas es muy importante porque es el encargado de determinar las características genotípicas y fenotípicas del organismo.

El proceso de transferencia de información se ilustra en la figura 10.3. La doble hélice del ADN se desdobra y se genera una copia complementaria –ARNm– que tras-

Figura 10.3

LA SÍNTESIS DE PROTEÍNAS A PARTIR DE LOS ÁCIDOS NUCLEICOS



¹⁴ Existen más de 300 aminoácidos en la naturaleza, pero solamente 20 de ellos se presentan en las proteínas.

lada la información al protoplasma celular. Allí el ARNt –ARN *de transferencia*– lleva los aminoácidos a las estructuras llamadas ribosomas, que incorporan los aminoácidos a la cadena de la proteína, terminando el proceso de transferencia de información desde el núcleo de la célula hacia el protoplasma. La información de las bases –en el núcleo de las células– se convierte entonces en secuencias de aminoácidos.

El tercer avance conceptual radica en la interpretación de los codones como aminoácidos, que se conoce con el nombre de código genético. En síntesis, la información que determina el comportamiento de los eucariontes se encuentra en el núcleo de cada una de las células y la transcripción de la misma resulta en proteínas encargadas de regular el metabolismo celular.

3. Aplicaciones de la bioinformática y la biotecnología en las TIC

Como es de esperar en el comienzo de un nuevo paradigma, la relación entre la biología molecular y las ciencias de la información se encuentra en la actualidad en un proceso de crecimiento explosivo. En este momento no se vislumbra un límite físico o conceptual, pero cabe observar que recién se está comenzando a recorrer el camino y el límite, si existiera, indudablemente está muy lejos. Las interrogantes que concierne el enfoque de este libro se refieren al impacto del avance en la biología para los futuros sistemas de computación y de las comunicaciones. Mientras las respuestas pueden ser inciertas en la actualidad, se estima que en el futuro cercano seremos capaces de aplicar el conocimiento derivado de la biología moderna a las TIC de las siguientes formas:

- Aplicación del análisis de patrones –derivados del estudio del almacenamiento de información en las proteínas– para lograr codificación óptima.
- Mejoramiento de la confiabilidad de los equipos de cómputo, mediante el uso de nanomáquinas fabricadas sobre la base de componentes orgánicos.
- Reducción del tamaño de los dispositivos de almacenamiento en las computadoras modernas, con el reemplazo de las tecnologías que funcionan sobre la base de silicio por tecnologías orgánicas.
- Adopción de paradigmas de cómputo que giren en torno al alto paralelismo tácito de los mecanismos de reproducción orgánica, como la computación con ADN.
- Diseño de sistemas de cómputo orgánicos que funcionen sobre la base del paradigma de Turing.
- Diseño de subredes tolerantes a fallas que funcionen sobre la base del análisis de redes de interacciones metabólicas.

Se exploran a continuación algunos ejemplos de aplicaciones de la adopción de conceptos biológicos para avanzar en las TIC.

Una de las aplicaciones más obvias es la de aprender de la vida el arte de codificar información. Tal como se ha expuesto anteriormente, el desarrollo de códigos eficaces es la condición básica de la que dependen la transmisión y el almacenamiento de infor-

mación. Por ejemplo, el estudio de la codificación de los procesos metabólicos nos muestra que dicha codificación es muy eficiente porque permite almacenar la información de manera muy compacta. Por medio de los genes, la naturaleza se ha ingeniado para empaquetar en las proteínas la máxima información en el mínimo espacio. Otro ejemplo es que se ha demostrado que la información contenida en las cadenas de proteínas es prácticamente imposible de descifrar debido a la forma en que se encuentra compactada (Nevill-Manning y Witten, 1999). En este sentido, las lecciones que nos enseña la biología pueden ser utilizadas para el almacenamiento y la transmisión efectiva de información. A continuación se presentan algunos ejemplos de aplicaciones interesantes de la biotecnología y la bioinformática en las TIC.

Los materiales que se han utilizado hasta la fecha en la microelectrónica y en particular en la construcción de semiconductores han sido inorgánicos. Recientemente se ha apreciado el empleo de nuevos materiales orgánicos, como *proteínas*, que cambiarán significativamente el diseño y construcción de los nuevos dispositivos al combinar material biológico y no biológico. Los materiales orgánicos permiten la modificación en su síntesis, planteando distintas posibilidades tanto en los enlaces como en la distancia y distribución de las nubes electrónicas. Es decir, se puede modificar la capacidad de conducción electrónica, su velocidad y situación espacial, características que los hacen extremadamente atractivos.

La *bacteriorrodopsina*, por ejemplo, es una proteína color púrpura que se encuentra en la membrana de la bacteria *halobacterium salinarum*, y que vive bajo condiciones extremas en ambientes acuáticos salados, a altas temperaturas y bajo situaciones casi anaeróbicas –sin la presencia de oxígeno. Al estar expuesta a estados tan extremos, esta proteína tiene propiedades que son muy difíciles de localizar en material inorgánico. Es estable a temperaturas arriba de 140°C, no se ve afectada por la exposición al aire y al sol durante años, tolera altas concentraciones de sal y puede ser incorporada, por ejemplo, al plástico sin que su estructura sufra modificaciones. La *bacteriorrodopsina* es una proteína que recoge la luz y por tanto podría ser utilizada como elemento fotoactivo, en dispositivos ópticos, incluyendo memorias de una computadora, puertas lógicas o conmutadores, moduladores ópticos o en nanocomputadoras basadas en proteínas. Al absorber la luz, las moléculas de esta proteína bombean protones a través de la membrana de la célula, generando un potencial electroquímico que sirve como fuente alternativa de energía para los procesos metabólicos. Existen tres grandes ventajas de un dispositivo de memoria construido con estas proteínas: a) las operaciones de lectura-escritura se podrían realizar en paralelo, b) se utilizaría la óptica en la que los fotones son mucho más rápidos que los electrones y c) la memoria podría ser tridimensional, lo cual permitiría almacenar densidades de 10^{11} a 10^{13} bits por cm^3 (Wilson y otros, 2002).

Científicos de la empresa Hewlett-Packard y de la Universidad de California en Los Ángeles (UCLA) elaboraron un interruptor molecular, el cual representa la base de cómo funciona una computadora (Collier y otros, 1999). Los expertos consideran que este dispositivo representa un gran paso para la fabricación de las supercomputadoras moleculares construidas sobre una estructura cristalina. Por otro lado, en la compañía IBM se ha estado trabajando en la elaboración de computadoras moleculares

para encontrar una alternativa a los semiconductores fabricados sobre la base de silicio, que han alcanzado su punto máximo en términos de miniaturización. En la empresa se construyó el circuito más pequeño del mundo, por medio de moléculas individuales de monóxido de carbono;¹⁵ en la goma que se encuentra en la parte de arriba de un lápiz podrían caber 190.000 millones de circuitos. Representantes de IBM señalan que la nueva técnica de cascada molecular permite desarrollar elementos lógicos 260.000 veces más pequeños que los utilizados en semiconductores construidos con silicio.

Otra aplicación de creciente importancia son los biosensores para el reconocimiento de la secuencia de ADN. Las dimensiones similares entre moléculas de ADN, enzimas, anticuerpos y nanopartículas metálicas o semiconductoras permiten crear sistemas híbridos en los que se combinan las propiedades catalíticas y electrónicas de las nanopartículas con las propiedades biocatalíticas y de reconocimiento de biomoléculas (Willner, Basnar y Willner, 2007). Los biosensores dan mejor protección a la información almacenada, ya que se podrán utilizar como candados de seguridad que sólo permitan el acceso a la información al individuo con un cierto ADN o tipo de sangre. Para realizar este tipo de reconocimiento se requiere de una cantidad minúscula de material orgánico.

Una aplicación que será revisada en detalle más adelante en el capítulo sobre el futuro de la computación es la *computación con ADN* o *computación molecular*. Es una forma de computación en la que se utilizan conceptos de bioquímica y biología molecular en lugar de los conceptos tradicionales de la informática. La computación molecular, en cierto sentido, es fundamentalmente similar a la computación paralela, porque aprovecha las ventajas de múltiples moléculas diferentes de ADN para explorar diversas alternativas al mismo tiempo.

c. Conclusiones

Varias soluciones tecnológicas a nivel molecular llegan a ser omnipresentes. El paradigma digital es penetrado cada vez más por las tecnologías con las que se manipulan moléculas, tal como las nanotecnologías y biotecnologías. Es de esperar que el paradigma en el que se trabaja con materia viva o muerta a nivel molecular lleve a la próxima onda larga socioeconómica de la humanidad, lo que no significa que el paradigma digital vaya a ser reemplazado. La lógica del desarrollo según la teoría evolucionista convierte al paradigma digital en una condición *sine qua non* para el progreso socioeconómico, como los paradigmas previos de termodinámica o electricidad constituyen las bases para sostener nuestra organización socioeconómica actual.

Las nanotecnología y la biotecnología son disciplinas en evolución que permitirán modificar no solamente nuestro entorno, sino también nuestra propia estructura humana. Es importante destacar que las nuevas tecnologías, y en particular las que incorporen células vivas, no están ni deben ser ajenas a controversias éticas y morales.

¹⁵ Información sobre el proyecto: http://research.lifeboat.com/carbon_monoxide.htm

Tal como sentencia el viejo dicho, cada tecnología y cada dispositivo hecho por el hombre es un buen servidor, pero un mal maestro. Al comienzo de un descubrimiento tecnológico no siempre está claro quién domina a quién, y por tanto es importante establecer un nuevo *corpus* legislativo que prevea los potenciales peligros y sancione los excesos. Asimismo, cobran cada vez más importancia los organismos reguladores que tengan la misión de salvaguardarnos de los efectos nocivos y de privilegiar los efectos positivos mediante la promulgación de políticas congruentes e integrales.

11. CAPTACIÓN E INTEROPERACIÓN DE INFORMACIÓN¹⁶

Existe una gran variedad de dispositivos que permiten la captación y adaptación de información y habilitan la interoperación entre el ser humano y las TIC, entre las TIC y su entorno, y directamente entre los diferentes sistemas tecnológicos. La interoperabilidad (del inglés *interoperability*) es la condición mediante la cual se puede intercambiar información entre sistemas heterogéneos. En otras palabras, la interoperabilidad es una condición indispensable para un sistema de información. Las tecnologías correspondientes son tan omnipresentes que muchas veces no están consideradas de forma separada. Sin embargo, como se demostrará en este capítulo, la evolución de los dispositivos de captación, adaptación y despliegue de la información definen en muchos aspectos lo que nosotros consideramos como las TIC.

La primera idea que viene a la mente al pensar en una tecnología de la información y de las comunicaciones, es quizás la computadora personal (de escritorio o portátil) en la cual la interacción se da a través de dispositivos como el teclado, el ratón y la pantalla. Estos dispositivos son las interfaces físicas de la computadora. Para acceder a los programas, aplicaciones y datos dentro de la máquina, se recurre también a una interfaz lógica o interfaz de usuario, una abstracción conceptual que permite identificar estos objetos como archivos almacenados en carpetas con distintas propiedades.

La interfaz de usuario más popular consiste en la representación gráfica de programas como iconos seleccionados a través del ratón que se ejecutan en ventanas desplegadas en la pantalla de la computadora. Los comandos y opciones de los programas pueden ser seleccionados a través de menús dispuestos en secciones específicas de las ventanas. Esta interfaz, conocida comúnmente por la sigla en inglés WIMP (*windows-icons-mouse-pointer*), ha sido sumamente exitosa durante más de veinte años, un período sorprendentemente largo cuando se habla de las TIC. Esta abstracción permitió que la computadora pudiera ser utilizada prácticamente por cualquier per-

¹⁶ Este capítulo fue elaborado por José Incera de la División Académica de Ingeniería del Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM), Osvaldo Cairó del Departamento Académico de Computación del Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM) y Raúl Esquivel del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

sona, que no tiene que ser experta, porque se trata de una interfaz centrada en el usuario (Canny, 2006).

Sin embargo, este modelo de interoperación humano-computadora (IHC) empieza a mostrar sus limitaciones ante los nuevos entornos que han sido creados por la evolución de las TIC. Las consolas de videojuegos, los reproductores de DVD, los nuevos televisores, un número cada vez mayor de sistemas de control en el automóvil y el hogar, son tan sólo algunos ejemplos de equipos computacionales utilizados por el ser humano en la actualidad. La creciente importancia y variedad de las TIC demanda una familiaridad casi intuitiva de una gran variedad de personas. El acelerado progreso tecnológico no permite largos procesos de aprendizaje con cada nuevo dispositivo y los usuarios demandan que la tecnología se adopte a sus hábitos, y no al revés. Por ejemplo, las interfaces convencionales de dispositivos móviles resultan poco intuitivas para aplicaciones de internet y entorpecen las tareas que el usuario desea realizar (Hybs, 1996). La interoperación con estos dispositivos debe ser lo más natural posible para poder aprovechar sus funcionalidades. Estos avances han conducido a una muy fértil actividad en los últimos años enfocada al diseño y desarrollo de interfaces más amigables y ergonómicas, capaces de ofrecer un intercambio de información entre el usuario y la computadora que sea más natural, eficaz y productivo, inspirado en la forma en que los humanos nos comunicamos.

En el presente capítulo se ofrece una panorámica general sobre lo más avanzado y las tendencias principales en la interoperación entre el ser humano y sus máquinas de información. Se inicia con una breve presentación de las tecnologías de sensores, y se describen brevemente los aportes recientes más relevantes en los dispositivos diseñados para ingresar y extraer información de los sistemas de TIC de forma interactiva. Se presentan a continuación algunos conceptos nuevos sobre redes de sensores, computadoras para vestir, cómputo ubicuo, la llamada internet de las cosas, la cognición aumentada, realidad aumentada y realidad virtual. Por último, se comparan algunas reflexiones en la conclusión.

a. Sensores

La rápida evolución de sensores en aplicaciones privadas, científicas e industriales y el enlazamiento entre sí, conduce a la formación de redes perceptivas que conectan cada vez más íntimamente los mundos real y virtual (Culler y Mulder, 2004). Un *sensor* es un dispositivo que detecta o mide manifestaciones de cualidades o fenómenos físicos, como la energía, velocidad, aceleración o luz, y convierte estas manifestaciones en una señal analógica o digital. En realidad es un tipo de *transductor* que transforma la magnitud que se quiere medir en una señal cuantificable. Los sensores pueden ser de indicación directa o de indicación indirecta. Un ejemplo para el primer caso es el termómetro de mercurio, un material inteligente que responde a un tipo específico de información, en este caso el calor, es decir la velocidad de movimiento de las moléculas. Un ejemplo de sensor indirecto es el conocido radar (*radio detection and ranging*), que, sobre la base de la velocidad de propagación de las ondas radioeléctricas, permite localizar y determinar la distancia, altitud, dirección o velocidad de

objetos. En este caso se utiliza un convertidor analógico a digital para desplegar la información que no se encuentra *in situ*. En otras palabras, un sensor puede ser construido de dos diferentes maneras. Por un lado, se puede utilizar algún material inteligente que reacciona a algún estímulo externo; dado que se conocen las propiedades de este material, se puede identificar la existencia del estímulo cada vez que la reacción es observable. Por otro lado, se puede derivar información sobre la base de las propiedades de algún fenómeno físico sin la necesidad de algún estímulo específico; como se conocen las características físicas del objeto en cuestión, se puede derivar información sobre aspectos relacionados con este comportamiento.

En la actualidad podemos observar múltiples aplicaciones de sensores en la industria aeroespacial y automotriz, la agricultura, el transporte, la energía, las comunicaciones y la robótica. En los nuevos automóviles los sensores miden la presión de las llantas, la temperatura del motor, los cambios bruscos en la aceleración para desplegar las bolsas de aire, y la temperatura del interior, entre otros. Estos automóviles tienen más potencia computacional que la nave *Apollo 13* (Schutzberg, 2004). El gran desarrollo de la nanotecnología ya permite la construcción de micro y nanosensores. Se empiezan a observar aplicaciones de sensores en el procesamiento de alimentos, las TIC, la protección del medio ambiente, la salud, la seguridad y el sector del esparcimiento (Andersen y otros, 2004).

A continuación se presenta una explicación de los diferentes tipos de sensores. Cabe aclarar que en la literatura aún no se observa un estándar reconocido para la clasificación de los mismos. Algunos autores los catalogan de acuerdo con el estímulo o variable física que miden, mientras que otros lo hacen según su arquitectura interna –mecánicos y electrónicos–; el tamaño –sensores, microsensores y nanosensores–; tipo de comportamiento que exhiben –convencional o inteligente–, o simplemente por el medio de propagación que utilizan –físico o inalámbrico. En este informe se presentan los tipos de sensores más importantes sin una clasificación en particular. El punto de partida son los materiales inteligentes, que son la base de los sensores. Éstos son los mensajeros que intermedian entre el mundo material y el mundo de la información.

1. Materiales inteligentes

Se considera un *material común* a aquel material que tiene una respuesta limitada a un estímulo externo y no posee propiedades particularmente especiales.¹⁷ Un *material inteligente*, por otra parte, es el que tiene capacidades especiales que le permiten responder de diferente forma al ser sometido a estímulos externos, con la restricción de que este cambio debe ser reversible, es decir, en ausencia de dicho estímulo el material debe regresar a su estado inicial (Smith, 2005; Addington y Schodek, 2004). Estos materiales son diseñados para actuar bajo un efecto conocido, como tensión,

¹⁷ En ciencia se considera un *material* a cualquier conglomerado de materia o masa. En ingeniería, en cambio, se considera un *material* a una sustancia o compuesto químico con alguna propiedad útil, ya sea mecánica, eléctrica, óptica, térmica o magnética.

temperatura, humedad, pH, campo eléctrico o magnético, pero de forma controlada. Esto permite utilizarlos para una gran variedad de sensores y actuadores (Humbeeck, Reynaerts y Peirs, 1996). La propiedad que puede ser modificada determina el tipo de aplicaciones en los que se puede utilizar el material.

Un *fluido magnetorreológico*, por ejemplo, es un fluido de baja viscosidad, pero que al recibir el efecto de un campo magnético se solidifica. Se puede lograr entonces que el sistema cambie de un fluido normal de baja viscosidad a un fluido con un gran esfuerzo umbral –plástico– con una elevada viscosidad efectiva controlada por el campo magnético aplicado. De manera similar, en un *fluido termorreológico*, un pequeño cambio de temperatura permite que el material pase de ser un sólido viscoelástico a un fluido, como se observa en la figura 11.1.

Este tipo de materiales puede proporcionar la solución a una gran cantidad de problemas de ingeniería, dado que pueden traducir información de un agente a un mensaje entendible para otro agente. Esto es la base para desarrollar una infinidad de nuevos productos. Los beneficios tecnológicos de los materiales inteligentes ya se comenzaron a identificar en aplicaciones de ingeniería civil, *mecatrónica*, la industria aeroespacial y productos domésticos, y el uso masivo de este tipo de materiales comenzará en los próximos años. En el recuadro 11.1 se presentan algunos tipos de materiales inteligentes.

2. Sensores térmicos

Los sensores térmicos se utilizan para detectar cambios de temperatura y corrientes de calor. También se pueden utilizar para sensar otro tipo de cantidades, como por ejemplo la radiación y los flujos de líquidos y gases. Las aplicaciones comunes de los

Figura 11.1

FLUIDO INTELIGENTE DESARROLLADO EN EL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MICHIGAN, ESTADOS UNIDOS. UN PEQUEÑO CAMBIO EN LA TEMPERATURA PRODUCE UN CAMBIO GRANDE EN LA VISCOSIDAD DEL FLUIDO.



Recuadro 11.1**EJEMPLOS DE LOS MENSAJEROS QUE INTERMEDIAN ENTRE EL MUNDO DE LA INFORMACIÓN Y EL MUNDO MATERIAL**

*Materiales piezoeléctricos.*¹⁸ Estos polímeros, cerámicos o cristales materiales tienen la particularidad de poseer una polarización espontánea que genera un voltaje cuando se le aplica presión o, inversamente, se deforma bajo la acción de un campo eléctrico, de una manera predecible y bien definida. Cuanto mayor sea el campo aplicado, mayor es la deformación. Esta respuesta a estímulos externos es bien conocida a escalas mesoscópicas.¹⁹ El efecto piezoeléctrico es normalmente reversible. Al dejar de someter los metales a un voltaje exterior o campo eléctrico, recuperan su forma. Este tipo de materiales tiene un uso potencial en actuadores que controlan máquinas y herramientas de precisión, la mejora de partes robóticas para moverlas más rápido y con mayor precisión, circuitos microelectrónicos en máquinas –desde computadoras hasta impresoras fotolitográficas– y el monitoreo de fibras en puentes y edificios, entre otros.

Materiales reológicos. Los materiales inteligentes comprenden no solamente sólidos sino también fluidos, como los *electrorreológicos*, *magnetorreológicos –MR–* y *termorreológicos* que pueden cambiar instantáneamente su estado al recibir una carga eléctrica, magnética o un cambio de temperatura. En los próximos años se pueden aplicar en dispositivos que absorban impactos, reguladores de asientos de automóviles y equipos de gimnasia, y en todo tipo de terminaciones ópticas. Los MR ya se están utilizando en la actualidad en las suspensiones de los automóviles *Cadillac* y en la segunda generación del *Audi TT*. El material es más costoso que los tradicionales, pero permite un mejor y más rápido ajuste de la suspensión, dependiendo de las condiciones del camino, mediante un cambio en la viscosidad.

Materiales termosensibles. Este tipo de materiales –combinaciones de nitinol, níquel y titanio– comprende a aquellos que cambian su forma en respuesta al frío o al calor. El material alcanza una forma a cierta temperatura y se modifica al presentarse un cambio de la misma. En el momento que se regresa a la temperatura original el material recupera su forma primaria. Este tipo de materiales tiene un uso potencial en implantes médicos, partes de aviones y helicópteros, transductores y termostatos. En la actualidad, incluso, ya se están diseñando ventanas que respondan a cambios de temperatura modificando sus propiedades de conductividad térmica.

(Continúa)

¹⁸ La *piezoelectricidad* es un fenómeno presentado por determinados cristales, naturales o sintéticos, que al ser sometidos a tensiones mecánicas adquieren una polarización eléctrica en su masa, apareciendo una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie, y se deforman bajo la acción de fuerzas internas al ser sometidos a un campo eléctrico.

¹⁹ En las estructuras mesoscópicas las propiedades físicas están alteradas por efecto del tamaño. Sin embargo, el tamaño a partir del cual un sistema comienza a comportarse como sistema mesoscópico depende fuertemente del material específico.

Recuadro 11.1 (Continuación)

Materiales sensibles al pH. Este tipo de materiales se puede expandir o colapsar cuando el *pH* cercano cambia. Existe, además, la posibilidad de que adquieran otro color cuando ocurre un cambio de *pH*. Una aplicación potencial importante se presenta en las pinturas que pueden cambiar el color para indicar que existe corrosión en el metal pintado.

Geles inteligentes. Este tipo de materiales tiene la capacidad de contraerse o expandirse hasta por un factor de 1.000 ante un estímulo físico o químico. El relativo bajo costo necesario para su fabricación, combinado con su habilidad intrínseca para realizar cambios significativos y reversibles, hacen a este tipo de materiales el vehículo perfecto para absorber, encapsular o liberar otros materiales. En los próximos años, seguramente, este tipo de materiales podrá ser utilizado para crear órganos artificiales, alimentos, cosméticos, medicinas, sensores y actuadores. En la actualidad ya se están utilizando sistemas que incorporan *geles inteligentes* para reducir las vibraciones en lavadoras, cohetes, satélites, compresores de aire acondicionado y otros artefactos. En medicina, incluso, se está analizando la posibilidad de encapsular insulina en aerogeles que se liberen en respuesta a la concentración de azúcar en la sangre.

Nanomateriales inteligentes: Uno de los mayores retos en el desarrollo de *nanomateriales* es el de fabricar materiales inteligentes a escalas entre 1 y 100 nanómetros. Además de la reducción en las dimensiones, un *nanomaterial inteligente* debe presentar efectos nuevos, que se manifiesten específicamente a escalas atómicas y moleculares. Por ejemplo, las partículas de cobre a escala nanométrica tienen una dureza superior al cobre a macroescala. En forma similar, otras propiedades como la conductividad eléctrica y reactividad química también se modifican. Los dos principales factores por los que cambian ciertas propiedades físicas a nanoescala son el incremento en efectos de superficie y de naturaleza cuántica. Esto hace que los nanomateriales tengan muy buenas perspectivas de aplicación en la electrónica, fotónica, computación y otros campos. Los nanomateriales inteligentes presentan otras características interesantes que consisten en tratar de imitar ciertos aspectos biológicos como la autorreparación. Es decir, un daño en la superficie del material como una raspadura se puede reparar sin una intervención externa. El nanomaterial debe ser capaz de detectar el daño automáticamente y reaccionar al mismo para iniciar el proceso de reparación, de tal manera que no se alteren las propiedades del material. Este tipo de materiales podría ser extremadamente útil en ambientes donde no resulta práctica la reparación de un dispositivo una vez que se encuentra en funcionamiento; por ejemplo, los satélites y reemplazos prostéticos como válvulas de corazón.

Fuentes:

Jacobs, J. (1999), "Smart structures and materials 1999: industrial and commercial applications of smart structures technologies", *Proceedings of SPIE*, vol. 3674, Bellingham, International Society of Optical Engineers.

(Continúa)

Recuadro 11.1 (*Continuación*)

- Aray, Y. y otros (2003), "Electrostatics for exploring the nature of water adsorption on the Laponite sheet's surface", *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 107, Washington, D.C., American Chemical Association.
- Humbbeck, J., D. Reynaerts y J. Peirs (1996), "New opportunities for shape memory alloys for actuators, biomedical engineering, and smart materials", *Materials Technology*, vol. 11, N° 2, Amsterdam, Elsevier.
- Wool, R. (2001), "*Polymer science: a material fix*", Nature, vol. 409, N° 6822, Houndmills, Nature Publishing Group.
- White, S. y otros (2001), "Autonomic healing of polymer composites", *Nature*. Vol. 409. N° 6822, Houndmills, Nature Publishing Group.
- Shahinpoor, M. y otros (1998), "Ionic polymer-metal composites (IPMCs) as biomimetic sensors, actuators and artificial muscles - a review", *Smart Materials and Structures*, vol. 7, N° 6, Bristol, Reino Unido, IOP Publishing Limited diciembre.
- Bar-Cohen, Y. (2000), "Electroactive polymers as artificial muscles-capabilities, potentials and challenges", *Handbook on Biomimetics*, Yoshihito Osada (ed.), Pasadena, California, NTS Inc.

sensores térmicos son el control de corrientes de calor en paredes, techos y pisos de edificios para lograr un uso eficiente de la energía; la observación de la temperatura en la tierra para aplicaciones en la agricultura y análisis de las condiciones de crecimiento de las semillas; la inspección de la radiación solar para uso óptimo de celdas solares; el control de la radiación del calor para el funcionamiento óptimo de hornos; la medición de la potencia de un láser; los estudios de la transferencia del calor en procesos de secado; el análisis de las propiedades térmicas de los materiales, como conductividad y difusión térmica, y otros.

A continuación se presentan los tipos de sensores térmicos más importantes:

*Pirosensores.*²⁰ Este tipo de sensores, que funcionan generalmente mediante la detección de una gama muy angosta de ultravioletas, se utiliza para determinar la presencia de fuego a distancia. Por ejemplo, un pirosensor construido con el bulbo UVTron de la empresa Hamamatsu puede detectar un fósforo encendido dentro de una habitación soleada a cinco metros de distancia. Es muy sensible en el rango de las longitudes de onda de 185-260 nm y se utiliza principalmente para la detección de llama en encendedores de gas y de combustibles líquidos, alarmas de fuego, monitores de combustión en quemadores, detección de descargas, conmutación ultravioleta, entre otros.

Sensores térmicos infrarrojos. Este tipo de sensores detecta la radiación térmica en una zona de objetos y la convierte en una señal de conmutación eléctrica. El espectro de los infrarrojos emitidos depende directamente de la temperatura del

²⁰ Véase la página: http://robots-argentina.com.ar/Sensores_pirosensores.htm

objeto. La ventaja principal de este tipo de sensores es que no existe ningún contacto mecánico entre el objeto y el sensor. Las aplicaciones fundamentales se presentan en los campos de la robótica y del entretenimiento –consolas de juego.

Sensores infrarrojos pasivos PIR. Los detectores *PIR* reaccionan sólo ante determinadas fuentes de energía, como el cuerpo humano. En este tipo de sensores se utiliza una fuente óptica *Fresnel*²¹ que distribuye los rayos infrarrojos en diferentes radios, los cuales tienen diversas longitudes e inclinaciones, y se obtiene así una mejor cobertura del área a controlar. Con estos sensores se puede captar la presencia de un individuo estableciendo la diferencia entre el calor emitido por el cuerpo humano y el espacio circundante. La tecnología está muy probada y tiene una exactitud, certificada por pruebas extensivas, de alrededor del 92%. En la actualidad se pueden utilizar en sistemas de seguridad; para la detección de sujetos extraños en un área específica, y para contar el número de individuos que atraviesan una determinada puerta –acceso a medios de transporte o edificios.

Sensores térmicos por fibra óptica. En este tipo de sensores se utilizan aparatos optoelectrónicos para medir la temperatura –procedimiento de retrodispersión Raman– con fibras de vidrio como sensores lineales. El sensor de temperatura consiste de un cable guía-ondas de fibra óptica, sensible al calor y a la radiación. Por medio de un aparato de evaluación se pueden determinar con resolución espacial los valores de temperatura en la fibra de vidrio del cable guía-ondas.

3. *Sensores electromagnéticos*

Los sensores electromagnéticos detectan, principalmente, corrientes, voltajes y campos eléctricos y magnéticos. En particular, permiten medir el aumento y la disminución de corrientes por cambios en el tiempo como, por ejemplo, el campo magnético de la Tierra debido a tormentas solares. Los sensores electromagnéticos más importantes se mencionan a continuación:

Sensores de magnetismo. Los sensores de magnetismo se utilizan principalmente para detectar la presencia de un campo magnético. Los más conocidos –pero no menos importantes– son la *brújula*, el *indicador magnético* y el *detector de metales*. El indicador magnético –*fluxgate compass*– es similar a la brújula, pero la lectura se realiza en forma electrónica, lo que permite que los datos se puedan digitalizar y transmitir fácilmente, así como desplegar en forma remota. En la actualidad existen indicadores magnéticos de una exactitud extraordinaria; se pueden utilizar en la navegación aérea, marítima y terrestre, e incluso en vehículos autotripulados. En el detector de metales, por otra parte, se aplica la inducción electromagnética para detectar un metal. Este tipo de sensores se utiliza para la remoción de minas terrestres o navales, para la detección de armas en los aeropuertos, en la explora-

²¹ Agustín Fresnel (1788-1827) fue un físico francés que desarrolló un tipo de lentes derivado de un plano convexo.

ción geológica y arqueológica, entre otros usos. Una de las aplicaciones más generales es la detección de vehículos, que también representa una clara muestra de las utilidades que se observarán próximamente. A los vehículos –bicicletas, automóviles o aviones– se debe adherir un material ferromagnético que perturbará la intensidad y dirección uniforme de los campos magnéticos de la Tierra; por tanto, un vehículo que porte este material se puede detectar fácilmente. Las posibles aplicaciones de este tipo de sensores son para el control del tráfico, la detección y el posicionamiento de vehículos, o la localización de espacios de estacionamiento vacíos. En los últimos años se han desarrollado diferentes tipos de sensores magnéticos y múltiples aplicaciones de los mismos. El *magnetómetro*, por ejemplo, es un dispositivo que se utiliza para medir tanto la intensidad como la dirección de un campo magnético. En la actualidad se encuentran magnetómetros de bajo costo, alta sensibilidad, rápida respuesta, tamaño pequeño y gran confiabilidad. Los más conocidos son la *balanza de Gouy* o la *balanza de Evans* (1974), que miden el cambio en peso aparente que se produce en una muestra al aplicar un campo magnético.

Sensores de posición lineal, angular y rotativa. Representan otro nuevo tipo de sensores. Con estos dispositivos se puede medir la dirección de ángulo de un campo magnético con una resolución menor a $0,07^\circ$, sin contacto, e incluso de objetos que se encuentran en movimiento. Estos sensores se utilizarán en los próximos años para todo tipo de aplicaciones que requieran de posicionamiento y desplazamiento lineal, como detección de la proximidad de objetos, válvulas de posición, control automático o guía de vehículos.

Sensores de resistencia, voltaje y corriente eléctrica. Con este tipo de sensores se mide la resistencia eléctrica, la diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito eléctrico y la intensidad de la corriente en un circuito eléctrico, respectivamente. El multímetro, por ejemplo, es un instrumento electrónico de medición que combina justamente las tres funciones señaladas en una sola unidad: ohmímetro –mide resistencia–, voltímetro –mide voltaje– y amperímetro –mide corriente.

Radar. El término es un acrónimo de *radio detection and ranging* (en inglés), lo que significa que es un dispositivo diseñado para localizar y determinar la distancia, altitud, dirección o velocidad de objetos tanto fijos como en movimiento –automóviles, barcos, aviones, formaciones climáticas–, fundado en la medición del tiempo que tarda en volver, una vez reflejado en el objeto en cuestión, un impulso de radiofrecuencia que envía el propio radar. Dado que se conoce la velocidad de propagación de las ondas radioeléctricas –velocidad de la luz– es relativamente fácil, por ejemplo, calcular la distancia a la que se encuentra el objeto sujeto de análisis. Este tipo de sensores permite enviar y recibir una señal sin importar incluso las condiciones atmosféricas y de iluminación. Los radares se pueden utilizar en múltiples contextos: detección de precipitaciones, control de tráfico aéreo, detección de la velocidad del tráfico, guía de misiles, actividad sísmica o desplazamientos de terreno, hidrología, exploración minera y petrolera, gestión de inundaciones e incendio de bosques, control de deshielos, y aplicaciones de inteligencia, vigilancia y defensa.

Sensores optoelectrónicos. La *optoelectrónica* es un campo de la *fotónica* que estudia la aplicación de los dispositivos electrónicos que interactúan con la luz, la

cual incluye formas invisibles de radiación como los rayos X, gama, ultravioletas e infrarrojos. Los *sensores optoelectrónicos* son dispositivos capaces de producir una señal eléctrica proporcional a la cantidad de luz que incide sobre el área activa del aparato. Los sensores optoelectrónicos más importantes son seguramente los sensores infrarrojos y los sensores de rayos láser.

4. *Sensores mecánicos*

Este tipo de sensores permite la medida de una gran variedad de parámetros físicos con una alta precisión y fiabilidad. Las aplicaciones de este tipo de sensores son muy variadas y de fuerte repercusión en la industria, especialmente si consideramos el gran avance en el desarrollo de técnicas de micromecanización. Los sensores mecánicos se pueden utilizar en la industria automotriz, en maquinaria y equipamiento en general, para la medición de agua y gas, en equipos de contenedores y ensamble, para el control de la calidad del aire, para la detección de gases tóxicos, y en robótica, entre otros. A continuación se presentan las clases de sensores mecánicos más importantes:

Resonadores. Este tipo de sensores está formado por una estructura mecánica que vibra en alguno de sus modos naturales. Son dispositivos con un elemento vibrante que cambian su frecuencia de resonancia mecánica al ver alterado alguno de los parámetros que la determinan, como la masa, la tensión mecánica o el estrés. Las aplicaciones importantes de este tipo de sensores se encuentran en el campo de la robótica y en teléfonos celulares e inalámbricos.

Sensores acústicos. Con este tipo de sensores se detectan las fluctuaciones de presión de una onda acústica que se convierte en una señal eléctrica medible. Las ondas sonoras se manifiestan por las variaciones de presión y velocidad que ellas generan. En la mayoría de los casos, el campo acústico en un punto es el resultado de la superposición de ondas sonoras que han experimentado reflexiones múltiples, y los sensores acústicos tienen aplicaciones en diferentes contextos. Se pueden utilizar, por ejemplo, para la detección temprana de tornados *sensando* el ruido de baja frecuencia producido por el embudo del tornado, para la colección de datos oceanográficos, en computación ubicua, en redes de sensores acústicos que funcionan bajo el agua,²² y otras aplicaciones.

Sensores de presión. En la mayoría de los casos, este tipo de sensores genera una señal eléctrica como respuesta a la presión ejercida. Los parámetros que son relevantes en este tipo de dispositivos son: rango de presión; referencia de presión –atmosférica, sellada, absoluta y diferencial–; tipo de salida –0-5V, 0-10V, 4-20 mA–, y tensión de alimentación –unipolar o bipolar. Las aplicaciones de estos sensores se encuentran completamente relacionadas con entornos industriales.

²² Existen múltiples aplicaciones de sensores acústicos que operan bajo el agua. Para obtener mayor información, consúltese: <http://www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn/UWASN/>

Sensores de gas y fluidos líquidos. Este tipo de dispositivos se utiliza, generalmente, para medir, categorizar o detectar gases o fluidos líquidos. Las aplicaciones son, generalmente, de tipo industrial: medidor de gas, medidor de agua, anemómetros, detector de gases tóxicos y combustibles, control del medio ambiente, detector de humedad y otros. Cabe señalar que algunos sensores de gas son clasificados dentro de la categoría de sensores de presión, y otros utilizan medios electrónicos en lugar de mecánicos.

5. Sensores nucleares

Entre estos sensores se encuentran los contadores Geiger y los detectores de neutrones. Este tipo de sensores se utiliza, fundamentalmente, para detectar procesos radiactivos. Los primeros sensores eran básicamente *electrómetros* que detectaban la forma en que se cargaba el aire circundante al incidir partículas radiactivas en la vecindad de dos placas metálicas, y la separación de las placas por fuerzas electrostáticas daba una medida de la radiación presente. Actualmente, estos sensores son semiconductores y funcionan convirtiendo la energía de partículas radiactivas en una señal eléctrica medible. La ventaja fundamental es que son pequeños y su sensibilidad es muy alta, por lo que pueden detectar pequeñas cantidades de material radiactivo. En la actualidad los sensores nucleares se utilizan, principalmente, en medicina nuclear, exploración geológica, sistemas de defensa y control de fronteras, además de la detección de plutonio y armas nucleares o radiológicas.

6. Sensores químicos y biosensores

Los sensores químicos son dispositivos analíticos que se utilizan para detectar la presencia de agentes químicos específicos o de iones en muestras complejas. El dispositivo, dependiendo de sus características, puede entregar la información en tiempo real o en línea (Stetter, Penrose y Yao, 2003). La arquitectura de estos dispositivos está conformada por dos partes, un elemento de reconocimiento molecular que interactúa en forma selectiva con un determinado componente de la muestra y un elemento instrumental formado por un transductor de la señal producida cuando reconoce la molécula.

Los sensores químicos se utilizan en diferentes contextos. Las aplicaciones más importantes se encuentran en: seguridad, control de procesos, higiene industrial, monitoreo de emisiones, diagnóstico clínico y alarmas de seguridad. Uno de los sensores químicos más utilizados es el detector de monóxido de carbono. Este dispositivo *monitorea* permanentemente el aire y activa una alarma si una cantidad invisible, inodora y potencialmente mortal de monóxido de carbono²³ supera las 400 partes por

²³ El monóxido de carbono es la principal causa de muerte por intoxicación en Estados Unidos. Actualmente, en diferentes países del mundo desarrollado se recomienda la instalación de este tipo de sensores en algunas habitaciones del hogar.

millón. Algunos sensores químicos con algún tipo de instrumentación, desarrollados recientemente, reciben nombres populares como *nariz electrónica (e-nose)* y *lengua electrónica (e-tongue)*. La nariz electrónica funciona prácticamente igual que un sensor de gas, puede distinguir y reconocer aromas que son combinaciones de gases y elementos volátiles, pero utiliza medios electrónicos en lugar de mecánicos.²⁴ Las lenguas electrónicas son sensores químicos que obtienen una medida del sabor y controlan la calidad de los alimentos; están compuestas de un conjunto de sensores que miden –en forma individual– una propiedad determinada de la muestra.²⁵

Los *biosensores*, por otra parte, son dispositivos que utilizan biomoléculas o partes de organismos vivos para poder convertir un estímulo bioquímico en una cantidad cuantificable. En realidad, un biosensor es un sensor químico que incorpora en su construcción materiales biológicos. Este tipo de dispositivos se compone de tres partes: el sensor biológico –tejido, cultivo de microorganismos, enzimas, cadenas de ácidos nucleicos, entre otros–; el transductor, y el detector, que puede ser óptico, piezoeléctrico, térmico o magnético.

Los biosensores pueden ayudar a resolver las limitantes existentes en los sensores químicos, en términos de velocidad, costo, calidad, ubicuidad, adaptabilidad y esterilidad (Turner, Karube y Wilson, 1990). El ejemplo más primitivo de un biosensor se presenta en las antiguas minas de carbón, en las que se utilizaba un canario para detectar la acumulación de gas. Un ejemplo de un biosensor moderno, por otra parte, lo representa el dispositivo que mide la glucosa en la sangre, en el que se utiliza una enzima que procesa moléculas de glucosa y libera un electrón por cada molécula procesada; la circulación de electrones se utiliza posteriormente para analizar la concentración de glucosa. Los biosensores serán ampliamente utilizados en la agricultura, el control de procesos industriales, el control de la contaminación medioambiental, los análisis clínicos, y otros campos.

²⁴ Las cámaras de medición en una nariz electrónica están dotadas de un número determinado de sensores –entre 6 y 32 en la mayoría de estos dispositivos. Las narices más avanzadas tienen incorporados sensores de gas de muy bajo consumo, como son los sistemas MEMS. Actualmente las narices electrónicas se utilizan para separar los cítricos sanos, para establecer el grado de frescura en la carne de pescado, para medir la calidad del aire, para detectar enfermedades de la piel, para diferenciar la calidad de alimentos y materias primas, o para identificar las cepas que conforman un tipo de vino, entre otros usos. En los próximos años, seguramente, se observará una gran cantidad de aplicaciones de este tipo de sensores.

²⁵ La respuesta del conjunto de sensores ofrece una huella característica para cada especie de la muestra. La suma de todas las huellas, finalmente, permite establecer un patrón de reconocimiento para cada sabor. Las lenguas electrónicas pueden detectar productos contaminantes o que alteren la calidad del alimento, impurezas y sustancias tóxicas, o clasificar distintos sabores. En la industria vitivinícola, una lengua electrónica, por ejemplo, puede discriminar entre varios vinos de una misma variedad, año o denominación de origen. El sensor desarrollado por Antonio Riul, en Brasil, puede distinguir entre dos Cabernet Sauvignons del mismo año pero de diferentes viñedos, o de diferentes años pero del mismo viñedo. El mismo dispositivo desarrollado por Riul, con algunas variantes, se puede utilizar para analizar la calidad del agua mineral o detectar si los granos de café de una plantación pueden tener calidad de exportación (Costa de Sousa y Riul, 2002).

Un ejemplo de aplicación es cuando se los utiliza para identificar la contaminación de fuentes de agua. Se ha demostrado que los biosensores que funcionan sobre la base de ADN son aptos para hacer un monitoreo rápido de fuentes de agua *in situ* y detectar componentes con afinidad al ADN. Este tipo de dispositivos son relativamente fáciles de construir, y consisten en fijar en un electrodo una cadena de ADN. La adherencia de contaminantes al ADN se mide de manera electroquímica o mecánica utilizando sistemas microelectromecánicos –MEMS, *Micro-electromechanical system*– (Marrazza, Chianella y Mascini, 1999). Una de las principales aplicaciones que se espera de los materiales inteligentes y los biosensores es el registro de datos e información de manera automática.²⁶ Una red de biosensores cutáneos, por ejemplo, puede monitorear la salud de los individuos, lo que reduciría la necesidad de personal de apoyo médico en los hospitales. Procesando la información que emiten los biosensores se puede conocer cuando un paciente requiere de asistencia personal. El gran obstáculo que se debe superar en la actualidad es el de la *biocompatibilidad*, es decir, los biosensores insertados *in vivo* deben ser capaces de funcionar sin afectar al cuerpo y al normal desempeño de la persona. Las dimensiones similares entre moléculas de ADN, enzimas, anticuerpos y nanopartículas metálicas o semiconductoras permite crear sistemas híbridos en los que se combinan las propiedades catalíticas y electrónicas de las nanopartículas con las propiedades biocatalíticas y de reconocimiento de biomoléculas (Willner, Basnar y Willner, 2007).

Las clases de sensores químicos y biosensores más importantes se presentan a continuación:

Sensores de oxígeno. Este tipo de sensores mide la proporción de oxígeno (O₂) en el gas o líquido que se quiere analizar. El elemento *sensante* se construye, generalmente, con un bulbo de cerámica de zirconio recubierto en ambos lados con una capa delgada de platino. Las aplicaciones más comunes de este tipo de sensores se presentan en medicina –monitores de anestesia, respiradores y concentradores de oxígeno– y en la industria automovilística, principalmente para medir el desempeño de la combustión interna del motor del vehículo. Representantes de Bosch anunciaron recientemente²⁷ que la empresa ya ha vendido más de 400 millones de sensores de oxígeno para la industria automovilística.

Sensores electroquímicos. Este tipo de dispositivos se utiliza principalmente para detectar gases tóxicos –en partículas por millón–, incluyendo NH₃, CO, CL₂, H₂, HCL, HCN, H₂S, NO, NO₂, O₂, O₃ y SO₂. El dispositivo reacciona con el gas que se desea detectar, y produce una señal eléctrica proporcional a la concentración del gas. Cada sensor se diseña especialmente para el tipo de gas que debe detec-

²⁶ Cabe señalar que en la actualidad ya existen algunas aplicaciones de este tipo. Sin embargo, en la mayoría de los casos son experimentales.

²⁷ Para obtener mayor información sobre los sensores de oxígeno en la industria automovilística, consúltese: <http://www.terra.com/noticias/articulo/html/act803162.htm>

tar, por tanto, el tamaño físico, la geometría, la selección de sus componentes y la construcción del sensor dependen de la intención de uso. Estos dispositivos se usan principalmente en alarmas.

Sensores optoquímicos. El funcionamiento de estos sensores se basa en las propiedades de conducción de algunos materiales semiconductores, cuyas características dependen de la luz que incide en ellos. Los sensores optoquímicos se clasifican de acuerdo con el tipo de propiedad que miden: absorbencia, reflectancia, luminiscencia, fluorescencia, dispersión de la luz, efecto optotérmico, o índice de refracción. La aplicación más importante de este tipo de dispositivos es el *monitoreo* de fibras ópticas.

Sensores radiométricos. Este tipo de sensores se utiliza para medir las propiedades de las radiaciones *X*, *beta* o *gamma*, y la aplicación más importante de estos dispositivos es la del Primer Atlas Mundial de Incendios²⁸ –*ATSR, World Fire Atlas*–. Los datos que proporciona el *atlas* se basan en los resultados obtenidos por el dispositivo ATSR –*Along Track Scanning Radiometer*– instalado a bordo del satélite ERS-2 de la ESA –lanzado en 1995– y el AATSR –*Advanced Along Track Scanning Radiometer*– del satélite Envisat de la ESA –puesto en órbita en 2002–. Los dos sensores radiométricos actúan como termómetros del cielo que miden la radiación térmica de infrarrojos para determinar la temperatura de la superficie terrestre. Los incendios se detectan con mayor facilidad en horas nocturnas, cuando la superficie circundante es más fría. Los sensores ATSR/AATSR clasifican las temperaturas superiores a 38,85 °C como incendios y son capaces de detectar fuegos tan pequeños como las llamas de gas de las instalaciones industriales.

Electrodos redox. El concepto de un *biosensor* basado en *sistemas redox* surgió de la investigación básica llevada a cabo en células de combustible biológico. Los electrodos redox son sensores inertes que desarrollan una diferencia de potencial en función de la relación entre las concentraciones de sustancias reductoras y oxidantes de la solución. La reducción de sustancias iónicas en el electrodo, ocurre simultáneamente con la oxidación de otras sustancias iónicas en la solución. Mediante reducción reversible, un electrodo inerte como el platino adquiere un potencial definido, dependiendo de la relación de concentración de iones en estado oxidado y reducido en la solución. Este tipo de sensores se puede utilizar para monitorear reacciones químicas como verificar la desnitrificación de aguas residuales, y los efectos de los desinfectantes y detergentes.

Biosensores optoelectrónicos. En este tipo de dispositivos el componente biológico inmovilizado es, generalmente, una enzima ligada a un cromóforo que a su vez está ligado a una membrana. Un cambio de pH generado por la reacción enzimática cambia el color del complejo cromóforo/membrana. El sistema transductor consiste en un simple diodo electroluminiscente –LED–, con una longitud de onda correspondiente al pico de absorción del cromóforo y un fotodiodo acopla-

²⁸ Para obtener mayor información sobre el *Atlas Mundial de Incendios*, consúltese: http://www.esa.int/esaCP/SEMGR19ATME_Spain_0.html

do. La cámara de flujo es extremadamente estable y presenta una señal aceptable. Los biosensores optoelectrónicos se utilizan en múltiples contextos: en el monitoreo remoto de lugares tóxicos (Knopf y otros, 2001); en aplicaciones médicas para el análisis de redes neuronales biológicas (Ghezzi y otros, 2007), y en el desarrollo de tecnología optoelectrónica integrada,²⁹ incluyendo la fabricación de microprocesadores y espectrómetros MEMS ópticos.

b. Interfaces

La interoperación con una tecnología de la información y de las comunicaciones como la que conocemos en la actualidad, se establece a través de los dispositivos de entrada (por ejemplo, teclado, ratón, lápiz óptico, micrófono) y de salida (por ejemplo, pantalla, impresora, graficador, audífono). Si bien el valor de estos dispositivos ha sido extensamente demostrado, todavía existe un gran potencial para mejorar la interacción entre el usuario y las TIC. Un porcentaje importante de los proyectos actuales en investigación y desarrollo de TIC está orientado a lograr modelos de interoperación más naturales e intuitivos. Se está trabajando activamente, entre otros, en el desarrollo de interfaces de voz y diálogo; reconocimiento de lenguaje natural; reconocimiento de características humanas (gestos, movimientos); visión por computadora, y mejores técnicas de despliegue. En esta sección se presentan algunos de los avances más sobresalientes en esta área.

Los primeros equipos de cómputo solamente podían ser operados por especialistas que hubieran sido capacitados. A mediados de los años cuarenta, ENIAC, considerada la primera computadora electrónica, era programada manualmente con cables que se conectaban para definir los valores binarios de los datos e instrucciones a ejecutar. Los avances tecnológicos rápidamente dieron paso a computadoras más veloces y eficientes, y a dispositivos de entrada y salida que simplificaban la interacción con ellas. En los años cincuenta, se populariza el procesamiento por lotes, el uso de tarjetas perforadas para introducir información y el de impresoras como dispositivo de salida. También aparecen las primeras terminales electrónicas equipadas con un teclado y una pantalla de tubo de rayos catódicos (CRT). La década de los años sesenta fue de grandes progresos. Nacen las minicomputadoras, y con ellas un número mucho mayor de organizaciones adquiere acceso a los recursos informáticos. También aparecen los trabajos de dos grandes investigadores, Licklider y Engelbart, que sentaron los cimientos de las interfaces de usuario más populares en la actualidad. No es exagerado pensar que sin el desarrollo de estas interfaces, la computadora personal, surgida en los años ochenta, estaría muy lejos de gozar de la aceptación que tiene en el día de hoy.

Joseph Licklider, ha sido una de las personas más influyentes en la historia moderna de las tecnologías digitales. Propuso las bases que eventualmente dieron origen a

²⁹ Para obtener mayor información consúltese: Center for Bio-Optoelectronic Sensor Systems. http://www.engr.uiuc.edu/communications/engineering_research/2002/RCL.html

Recuadro 11.2**LOS NANOSENSORES**

El futurista Ray Kurzweil (2005) llamó la atención pública con sus especulaciones sobre las posibilidades que se abren al utilizar nanosensores. Según su argumento, con la existencia de sensores de tamaño de una partícula de sangre, sería posible infiltrar el cuerpo completo de un ser humano con una red de sensores inalámbricamente conectados entre sí (nanobots). El funcionamiento del cerebro podría ser estudiado de esta manera y también sería posible reconstruir un cerebro humano átomo por átomo.

Los *nanosensores* son sensores físicos, químicos o biológicos construidos a escala nanométrica. Se utilizan, principalmente, para obtener una muestra –sensar un punto– y transportar la información de nanopartículas al mundo macroscópico.

Las aplicaciones de los *nanosensores* son muy extensas y seguramente transformarán la forma en que desarrollamos un gran número de actividades. En medicina, por ejemplo, los nanosensores podrán medir cambios en volumen, concentración, velocidad, desplazamiento, fuerzas magnéticas, eléctricas y gravitacionales, temperatura o presión de las células en el cuerpo. La forma de realizar el diagnóstico se transformará; los nanosensores serán capaces de reconocer ciertas células cancerosas como prevención, además de controlar o suministrar medicamentos. Otro experimento involucra el uso de las propiedades fluorescentes de *puntos cuánticos* de seleniuro y cadmio para descubrir tumores en el cuerpo. Al inyectar los puntos cuánticos en la masa corporal, el especialista puede observar el tumor o la célula cancerígena por la fluorescencia de los puntos cuánticos. En otro proyecto, un *nanosensor fluorescente*,³⁰ desarrollado por un grupo de investigadores del Hospital General de Massachusetts, detecta el tipo de muerte celular provocado por las terapias del cáncer. Estos nuevos nanosensores podrían proporcionar al fin a los oncólogos una prueba rápida que les permitiría saber si la terapia administrada está funcionando.

Michael Strano, profesor del Departamento de Química e Ingeniería Biomolecular en la Universidad de Illinois, en Urbana-Champaign, también ha desarrollado varios proyectos que involucran el uso de nanosensores en nanotubos de carbono. Su grupo de investigación elaboró un sensor óptico infrarrojo en una nanotubo de carbono de una sola capa, que permite medir la glucosa con la luz. El nanotubo contiene una proteína encapsulada en su interior, y puede implantarse a su vez dentro de una fina aguja debajo de la piel. El monitoreo de los niveles de glucosa se efectúa por medio de un aparato de láser que detecta la radiación infrarroja del nanotubo de carbono. Esto es posible porque la molécula de proteína, junto con otros componentes químicos, reacciona con la glucosa y altera la fluorescencia de los nanotubos.

En la actualidad, se está trabajando en diferentes proyectos que incluyen el uso de nanosensores en sistemas en los que el peso y el tamaño pueden representar una res-

(Continúa)

³⁰ Para obtener mayor información sobre el proyecto consúltese: http://nano.cancer.gov/news_center/nanotech_news_2006-02-21a.asp

Recuadro 11.2 (*Continuación*)

tricción, como por ejemplo en satélites y máquinas aeronáuticas. También se han utilizado para la construcción de circuitos integrados. El neurólogo colombiano Rodolfo Llinás de la Universidad de Nueva York ha llamado la atención pública con experimentos que apuntan a la introducción de nanocables dentro del cuerpo humano, que llegan hasta el cerebro y contribuyen al estudio de diferentes aspectos de su funcionamiento. Aunque las ideas de Kurzweil parecen estar vinculadas a la fantasía, es evidente que con la aplicación de los nanosensores se abre una gran variedad de posibilidades.

Fuentes:

Freitas, R. (1999), *Nanomedicine*, Volume 1: *Basic Capabilities*, Austin, Landes Bioscience.

Barone, P. y otros (2005), "Near-infrared optical sensors based on single-walled carbon nanotubes", *Nature Materials*, vol. 4, Houndmills, Nature Publishing Group.

internet, al concebir una red galáctica para interconectar computadoras a nivel mundial con el fin de poder acceder a datos y programas. En su trabajo fundacional *Man-Computer Symbiosis*, propone que "las computadoras deberían cooperar con los usuarios en la toma de decisiones y en el control de situaciones complejas, sin la dependencia inflexible de programas predeterminados" (Licklider, 1960). Para llevar a cabo esta visión, considera primordial facilitar la interacción humano-computadora e identifica diez problemas prioritarios que deberían ser resueltos. Más de cuarenta años después, la mayoría de los problemas planteados por Licklider han sido superados, pero otros aún siguen siendo grandes retos en los que hay una actividad intensa en diversos centros de investigación, tal como el perfeccionamiento de la comprensión del lenguaje natural sintáctica y semánticamente.

Douglas Engelbart, otra de las mentes más prolíficas en el mundo de las TIC, es indudablemente el creador de los conceptos más influyentes en el diseño de interfaces humano-computadora. En una espectacular presentación en 1968 de su sistema NLS, demostró, entre otras cosas, la creación de bibliotecas digitales y la recuperación de documentos a través de hiperenlaces, que dieron origen muchos años después a la *world wide web* (www); la primera sesión de videoconferencia; la edición de gráficos en dos dimensiones en una pantalla CRT; el concepto de ventanas en pantalla, y el diseño y uso del ratón para seleccionar y manipular objetos en la pantalla.

Las innovaciones propuestas por Engelbart resultaron demasiado avanzadas para poder ser exitosas comercialmente en su época. Algunos años después estas ideas fueron retomadas y extendidas con los aportes de otros investigadores en el centro de investigación de la empresa Xerox en Palo Alto (PARC), donde además del uso de ventanas, se desarrollaron la manipulación directa de objetos, las interfaces WYSIWYG (*What you see is what you get*) y el concepto de menú para organizar y acceder a la información, dando origen a las conocidos interfaces WIMP (*windows-icons-mouse-*

pointer). Estas ideas fueron plasmadas por primera vez en la computadora Xerox Star (1981), en la Apple Lisa (1982) y en la sumamente popular Apple MacIntosh (1984). Poco tiempo después, Microsoft toma estos principios para diseñar sus sistemas operativos Windows que han llegado a ser hegemónicos en el mundo de las computadoras personales.

1. Despliegue de información

Debido a la importancia y sofisticación de nuestro sentido de la vista, las pantallas (o unidades de despliegue visual) son la interfaz más común para el despliegue de información en las computadoras actuales y en una gran cantidad de dispositivos electrónicos como teléfonos móviles, agendas personales y cámaras. Ha habido un avance importante en las tecnologías utilizadas para la fabricación de pantallas, desde los cinescopios con tubos de rayos catódicos, hasta las actuales pantallas de cristal de cuarzo líquido y de plasma. Sin embargo, estos dispositivos presentan algunas limitaciones, particularmente en los ámbitos del cómputo móvil y ubicuo, debido a su fragilidad, consumo de energía y tamaño.

Pantallas flexibles

En varias empresas y centros de investigación se está trabajando en tecnologías para crear pantallas flexibles tan delgadas como el papel. Algunas de estas tecnologías ofrecen enormes ventajas en maleabilidad, ligereza, bajo consumo de energía y –potencialmente– bajos costos de producción, por lo que su impacto puede compararse al salto dado por la humanidad cuando pasó de escribir en tablillas de arcilla al pergamino.

Existen básicamente cuatro categorías de productos que se correlacionan con el nivel de desarrollo de la tecnología: a) pantallas rígidas delgadas; b) pantallas conformables, que pueden adaptarse a un contorno una sola vez, y quedan fijas con esa forma; c) pantallas flexibles, que pueden tomar formas suaves, como al enrollarse alrededor de un cilindro; d) pantallas que pueden ser dobladas y arrugadas a tal grado que se podrán unir a prendas de vestir. Las últimas dos categorías, aún en etapa experimental, permitirán contar con pantallas de un tamaño apropiado en dispositivos móviles.

Las tecnologías predominantes para crear pantallas flexibles son partículas con carga eléctrica suspendida en un fluido, y capas ultradelgadas de polímeros orgánicos emisores de luz (OLED) montados en algún sustrato flexible. Las primeras, conocidas como papel electrónico o tinta electrónica, reflejan la luz de manera similar a la tinta en papel y conservan su imagen aún sin recibir energía eléctrica, por lo que ofrecen excelentes características en ahorro de energía para dispositivos móviles. En algunos centros de investigación se está trabajando con técnicas similares complementadas con tecnologías nanocromáticas para producir pantallas transparentes y que pueden ser incorporadas, por ejemplo, al parabrisas de un automóvil (Mitchell, 2006a; Wang y otros, 2006).

Miniproyectores

Otra manera de resolver el inconveniente de contar con pantallas cada vez más pequeñas en dispositivos portátiles, consiste en sustituir la pantalla por un proyector que permita desplegar las imágenes en cualquier superficie. El problema con este esquema es que la imagen proyectada se distorsiona con las tonalidades e irregularidades de la superficie. Para ello, se han desarrollado distintas técnicas en las que se estima la distorsión producida y se aplican algoritmos para compensar dicha distorsión. (Zacks, 2004; Zollmann, Langlotz y Bimber, 2006).

Micropantallas

La idea de colocar pequeñas pantallas frente a los ojos, integradas a un casco o viseira (conocidas como HMD por su sigla en inglés, *head mounted displays*) fue propuesta originalmente por otro gran visionario de la computación, Ivan Sutherland, en 1968. Con la tecnología disponible en aquella época, su prototipo eran tan pesado que permanecía sujeto al techo de su laboratorio. Durante la segunda mitad de los años ochenta aparecieron los primeros HMD portátiles dentro de los sistemas iniciales de realidad virtual en proyectos militares.

En los primeros años del presente milenio se ha visto la proliferación de HMD comerciales a precios relativamente accesibles para ambientes de realidad virtual y se proyecta un crecimiento importante en las capacidades y usos de esta tecnología para entornos donde se requiera de visualización estereoscópica, visión nocturna o realidad aumentada. Los avances tecnológicos han dado lugar a un concepto similar: pantallas o monóculos montados en anteojos, llamadas FMD (*face-mounted displays*) de bajo costo, que pueden ser utilizados junto con dispositivos como agendas digitales y reproductores de video portátiles. En ellos se utilizan técnicas ópticas muy ingeniosas con las que se modifica el ángulo del campo visual para crear la sensación de tener una pantalla de mucho mayor tamaño a varios metros de distancia.

En las pantallas virtuales de barrido retinal (VRD, *virtual retinal displays*) también conocidas como pantallas de escaneo retinal (RSD, *retinal scan displays*), se utiliza una tecnología que consiste en dirigir un haz de luz con la imagen de una pantalla directamente hacia la retina del ojo, y el usuario percibe una pantalla de tamaño completo flotando frente a él. Aunque el concepto fue creado en la Universidad de Washington en 1991, hasta muy recientemente la tecnología ha permitido contar con LED de gran brillo y con técnicas ópticas capaces de adaptarse a las irregularidades del ojo, dando por resultado la sensación de una imagen con gran resolución y con una riqueza cromática mejor que la de las tecnologías de televisión actuales. Se está experimentando con sistemas VRD que se montan sobre el escritorio y, mediante técnicas de reconocimiento facial, detectan la posición del ojo para adaptar la emisión del haz adecuadamente. También se espera una notable mejora en la calidad de la percepción al introducir escáneres basados en MEMS, diodos superluminiscentes (SLED) y láseres de miniatura que permitan la modulación directa de la luz.

Visualización en tres dimensiones

Se ha trabajado intensamente en crear imágenes tridimensionales (3D) que ofrezcan una gran riqueza visual. El ser humano puede percibir profundidad principalmente gracias a que las dos imágenes que se forman en la retina están ligeramente desfasadas. Es el cerebro, al combinarlas en la corteza visual, el que aporta la sensación de tercera dimensión (Johanson, 2001). Sobre la base de este principio, los sistemas estereoscópicos buscan que la imagen que recibe cada ojo sea ligeramente distinta. Probablemente, la técnica más conocida consiste en utilizar anteojos polarizados que filtran distintas partes de la escena para cada lente. Sin embargo, al filtrar la imagen se pierde parte de su riqueza cromática. Otra técnica es la de utilizar anteojos con pequeñas pantallas LCD para cada ojo, sincronizadas con la fuente emisora, típicamente una pantalla de computadora. Las pantallas se activan y desactivan a alta velocidad conforme se despliega la imagen correspondiente a cada ojo. La sincronización puede hacerse por difusión si se desea contar con varios observadores. Alternativamente, en los HMD se puede desplegar una imagen distinta para cada ojo.

Estas técnicas presentan varias restricciones debido a las características ópticas en la captación y despliegue de las imágenes. Además, el uso de anteojos, cascos o dispositivos similares, puede ser molesto para los usuarios. Esto ha dado lugar a la creación de muy variadas técnicas de visualización que no requieren de dispositivos externos, entre las que destacan las que se presentan a continuación: (Halle, 1997; Onural y otros, 2006).

Sistemas autoestereoscópicos. Se utilizan distintas técnicas para alterar la imagen que se recibe en cada ojo. Los más sencillos disponen de una rejilla que bloquea las columnas de puntos que corresponden a cada ojo. En otros, la pantalla está cubierta por filtros ópticos que difractan en distintas direcciones las ondas luminosas en función de su longitud de onda (es decir, de su color). Estos sistemas son muy atractivos porque no dependen de la posición del usuario, por lo que se pueden tener varios observadores simultáneamente.

Sistemas volumétricos. En estos sistemas, los puntos que forman la imagen (voxeles) se iluminan dentro de una región bien determinada. Se han propuesto varios de estos sistemas con las más diversas tecnologías: retículas de LED que se activan y desactivan conforme la retícula se va desplazando; láminas de LCD traslúcidas que se activan secuencialmente a gran velocidad, en la que cada una despliega una sección de la imagen que se desea proyectar; espejos varifocales con distintos índices ópticos que oscilan en sincronización con una imagen 2D proyectada hacia ellos entre otros.

Sistemas holográficos. En una imagen bidimensional, cada punto conserva información sobre la amplitud y longitud de onda de los haces de luz reflejados, pero se pierde información sobre la fase, que es el componente principal de la percepción de profundidad. En una imagen holográfica, esta información sí se conserva. En los sistemas holográficos se busca que cada voxel en la escena emita rayos de luz con la amplitud, longitud de onda y fase apropiados, aunque desgraciadamente

estos sistemas generan y deben procesar enormes volúmenes de información (Onural y otros, 2006). Para recrear un ambiente holográfico, la captación de objetos se puede hacer de distintas maneras. Se han utilizado varias cámaras en semicírculo para obtener distintas vistas simultáneas, cámaras panorámicas con arreglos de espejos (Chinoy, 2002). Otras cámaras permiten medir la distancia, intensidad de luz y profundidad (Halan, 2003). En el proyecto Holovisión,³¹ financiado por la Unión Europea, se propone generar la imagen holográfica a partir de módulos ópticos que emiten rayos de luz en varias direcciones de manera controlada. Cada rayo se dirige hacia distintos voxels en la pantalla, y en cada voxel convergen varios rayos formando distintos colores e intensidades. El sistema de control puede hacer converger los rayos con ángulos tales que se genere la impresión de que el voxel correspondiente está detrás o delante de la pantalla, creando así la sensación tridimensional.³²

2. Teclado y pantallas táctiles

La tendencia a la miniaturización con respecto a los dispositivos móviles ha provocado que sus teclados sean muy difíciles de manipular, lo que provoca la frustración de los usuarios, o limita las posibilidades de uso. Es factible que, eventualmente, los teclados en estos dispositivos sean sustituidos por pantallas táctiles con reconocimiento de escritura y sistemas de reconocimiento de voz, como ha empezado a ocurrir en años recientes. Sin embargo, las ventajas de poder introducir información a través de un teclado, no necesariamente desaparecerán.

Desde hace varios años existen con éxito comercial teclados plegables que se pueden conectar al dispositivo móvil, y han surgido nuevas tecnologías que ofrecen funcionalidades similares. Por ejemplo, el Sensorboard es un ingenioso dispositivo que detecta el movimiento de las manos y los dedos cuando el usuario simula escribir sobre un teclado o desplazar un ratón en cualquier superficie.

Las pantallas táctiles han sido muy populares en nichos particulares como puntos de venta y kioscos de información. También son una interfaz de entrada común en las agendas personales y tabletas digitales. Estos dispositivos eran capaces de reconocer únicamente la presión de una sola referencia en la pantalla, pero recientemente se

³¹ <http://www.holovisionproject.org/>

³² Una iniciativa sumamente original y potencialmente revolucionaria está siendo desarrollada por científicos de la Universidad Carnegie Mellon y de Intel, y consiste en la reproducción tridimensional de objetos a través de pequeños dispositivos físicos capaces de ensamblarse dinámicamente con el fin de reconstruir la forma de los objetos a representar. Los dispositivos, llamados “claytronic atoms” o “catoms”, son el equivalente a las células orgánicas, capaces de combinarse con otros para formar sistemas más complejos, en este caso, los objetos a representar (Vander Veen, 2007). Por ahora se han logrado construir “catoms” de unos cuantos centímetros con capacidad de procesamiento y otros mucho más pequeños pero con muy poca funcionalidad.

mostraron con gran éxito pantallas capaces de reconocer la presencia simultánea de varios dedos (u otros medios apuntadores). Estas pantallas, llamadas multitáctiles (*multi-touch*), permiten manipular de forma intuitiva objetos en la pantalla para girar, rotar, desplazar y acercar. A nivel popular, seguramente tendrán una aceptación inmediata porque se utilizan en el novedoso dispositivo iPhone de Apple y en el innovador proyecto Surface de Microsoft.³³ También se han demostrado pantallas multitáctiles de varios metros de diámetro en las que varios usuarios pueden trabajar simultáneamente. Con la llegada de estas tecnologías, se espera que aparezcan nuevas aplicaciones que permitirán reducir drásticamente la complejidad de interactuar con la computadora (Greene, 2007a).

3. Voz y diálogo

Los primeros sintetizadores y reconocedores de voz tenían características técnicas bastante limitadas y eran utilizados en nichos específicos. Sin embargo, en los últimos años ha habido enormes progresos en la creación y procesamiento de voz, con lo que empiezan a aparecer interfaces mediante las cuales se pueden establecer diálogos breves, al menos en contextos puntuales.

Un campo donde los reconocedores de voz han crecido de manera importante, es en los sistemas telefónicos de respuesta interactiva (IVR, *interactive voice response*). Los primeros reconocedores de voz para sistemas IVR sólo aceptaban palabras sencillas (sí, no, el número de la opción a elegir) pero ahora se han hecho populares sistemas con vocabularios mucho más amplios capaces de entender frases simples y se están alcanzando grandes logros en sistemas capaces de reconocer estructuras sintácticas complejas.

En telefonía móvil también se han visto avances importantes. Los dispositivos móviles modernos son capaces de reconocer comandos para marcado, búsqueda de nombres y navegación de menú de manera eficaz y sin tener que pasar por una fase de capacitación como ocurría con los primeros sistemas (Canny, 2006). En estos dispositivos, una limitación es la capacidad de memoria actual, que no permite almacenar vocabularios de palabras muy grandes (O'Hanlon, 2006). Sin embargo, se espera que su capacidad de almacenamiento se multiplique enormemente en los próximos años.

En cuanto a la creación de voz, también se han logrado grandes avances. Con el uso de sofisticados procesadores de señales y por medio de segmentos de frases pregrabados, los nuevos sintetizadores de voz o sistemas de texto a diálogo (TTS, *text to speech*), están muy lejos de la voz artificial robotizada de los primeros sistemas.

En resumen, en las interfaces de voz los problemas tecnológicos han sido prácticamente superados. Los principales retos en la actualidad consisten en lograr que estas interfaces permitan una interacción más cercana al lenguaje natural con el fin de explotar las enormes habilidades lingüísticas y conversacionales que como especie

³³ Véase <http://www.microsoft.com/surface/>

hemos cultivado a lo largo de nuestra existencia. Este es un problema complejo que requiere de la colaboración entre disciplinas tan diversas como lingüística, psicología, filosofía, sociología, teoría de la información, electrónica, y computación (Cordial, *s/f*; Harris, 2005). Se han desarrollado prototipos capaces de mantener una conversación relativamente fluida en contextos particulares como la predicción meteorológica o la programación de películas (Waldrop, 2003), pero este tipo de interfaces requiere de una gran creatividad y son sumamente costosas en términos computacionales. Si bien el reconocimiento de lenguaje natural se encuentra en una etapa muy temprana de desarrollo, y parece lejana la posibilidad de contar con interfaces de reconocimiento de voz en varios idiomas (O'Hanlon, 2006), tanto en Estados Unidos (GALE) como en Europa (SpeeCon) se están desarrollando proyectos muy ambiciosos para reconocimiento y traducción de diálogos.

Por otro lado, una fecunda área de investigación reciente está relacionada con las llamadas interfaces perceptivas o cómputo afectivo. Las interfaces de voz, sobre todo al aproximarse a un diálogo natural, no sólo establecen un canal de entrada y salida, activan una dimensión cognitiva adicional capaz de erigir vínculos más estrechos entre el usuario y la computadora. La búsqueda de una interacción aún más fluida requiere la capacidad de interpretar, y eventualmente reproducir, las sutilezas de la comunicación humana en la que el estilo del diálogo, las inflexiones y hasta las expresiones corporales dan matiz y complementan el mensaje que se desea transmitir (Waldrop, 2003; O'Hannion, 2006; PRIMA, *s/f*).

4. Reconocimiento humano

La búsqueda de una interoperación humano-computadora más natural desde un punto de vista antropocéntrico, ha llevado a los investigadores a diseñar interfaces con la capacidad de reconocer algunas características humanas, como rasgos, gestos, posturas y movimientos, además de patrones biométricos y de escritura.

Las interfaces capaces de reconocer caracteres manuscritos han tomado un nuevo auge con la masificación de las agendas y tabletas digitales y se espera una segunda ola de crecimiento con la introducción del papel electrónico y el incremento en el diseño de interfaces multimodales. En la actualidad, los sistemas de reconocimiento de escritura son más tolerantes a las particularidades del individuo. Los sensores inerciales y de movimiento muy pequeños, han permitido diseñar interfaces basadas en el movimiento de las manos y brazos para controlar dispositivos. Un ejemplo muy reciente puede apreciarse en el mando inalámbrico de la popular consola de videojuegos Wii de Nintendo.³⁴ En aplicaciones computacionales se han desarrollado dis-

³⁴ El mando inalámbrico utiliza acelerómetros y sensores infrarrojos para reconocer el movimiento que realizan los jugadores. Los participantes, en lugar de utilizar un teclado o una interfaz de comandos, ahora pueden utilizar un objeto real –una raqueta, por ejemplo, en el caso del tenis– para realizar sus movimientos. El sensor infrarrojo inalámbrico tiene la capacidad de captar y transmitir los movimientos que realiza el usuario.

positivos como el *GestureWrist* de la empresa Sony, que pueden reconocer movimientos del antebrazo y cambios en la posición de la muñeca, actuando como un ratón virtual.

Las tecnologías para seguir el movimiento ocular han sido utilizadas exitosamente como interfaz de entrada para pacientes parapléjicos, aunque con limitada precisión y baja velocidad de operación. Recientemente, investigadores de la Universidad de Stanford en Estados Unidos han mejorado sustancialmente los programas que discriminan errores en estas tecnologías, y ya se empiezan a aplicar con resultados promisorios como sustitutos del ratón (Greene, 2007b).

La biometría, que consiste en el reconocimiento de características físicas (como la huella digital, la retina, el iris, la geometría facial y el ADN) o dinámicas (como el patrón de tecleo, la firma y los rasgos de escritura) ha sido muy utilizada en las TIC para verificar la identidad de un usuario. Esta posibilidad ofrece mayor protección a la información,³⁵ y el abaratamiento de varias de estas tecnologías ha permitido que se popularice su uso en un número cada vez mayor de dispositivos personales.

A pesar de los grandes avances conseguidos en los últimos diez años en tecnologías de reconocimiento facial, éstas todavía no han evolucionado lo suficiente para producir sistemas confiables en lugares públicos; se estima que el desarrollo de un reconocimiento fiable en ese tipo de entorno puede todavía tardar varios años (O'Brien, 2004). Los sistemas actuales funcionan muy bien en condiciones controladas donde los sujetos a evaluar pertenecen a un universo limitado de personas y el reconocimiento se lleva a cabo bajo condiciones de iluminación apropiadas. Se han hecho progresos muy significativos en el último año en la utilización de imágenes en 3D y el reconocimiento de texturas, que dan una precisión aún mayor que la de los humanos (Patrick, 2007).

El reconocimiento facial no solamente es utilizado para autenticar o identificar personas. Proyectos recientes basados en la identificación de gestos faciales, han permitido detectar con muy alta precisión si un usuario está mintiendo o diciendo la verdad o si está triste, contento, aburrido o distraído, lo cual abre muchas posibilidades en el área de cognición aumentada.

5. Interfaces hápticas

Las interfaces hápticas permiten una interoperación mediante el estímulo del sentido del tacto a través de fuerzas, vibraciones o movimientos; un ejemplo común de estimulación háptica es el modo vibrador de los teléfonos móviles. En un entorno más

³⁵ Algunos de los dispositivos de memoria USB ya cuentan con la opción de reconocimiento de la huella digital del usuario. El lector de huella digital y memoria USB 128 Mb Sony S180177 es un dispositivo de alta seguridad que permite mayor protección a la computadora y los datos. El lector es muy compacto y permite comprobar las huellas digitales de cualquiera de los diez dedos de una persona. Este dispositivo incluye por un lado una memoria digital USB de 128 Mb, y por otro lado el lector de huellas digitales junto con un *software* que le permite configurar los archivos que se van a proteger.

general, las interfaces hápticas son bidireccionales: la estimulación temporal se da en respuesta a movimientos del usuario. El resultado permite incrementar el intercambio de información entre la computadora y el usuario porque se puede percibir la sensación de tocar un objeto o de un efecto físico, como las fuerzas de torque en un proceso de ensamblado.

En un principio, estas interfaces eran sumamente costosas y estaban reservadas a ámbitos científicos e industriales para la simulación o modelado en entornos virtuales de inmersión total. Sin embargo, recientemente han surgido interfaces hápticas de bajo costo que han inyectado una nueva dinámica a este campo. Por ejemplo, en los juegos de computadora son cada vez más populares las manijas, volantes y pedales con retorno de fuerza para dar una mayor sensación de realismo y acentuar la experiencia del usuario.

A través del sentido del tacto se puede informar sobre elementos que podrían pasar desapercibidos a la vista, por lo que se han incorporado sistemas hápticos a interfaces multimodales en aplicaciones como la exploración de mapas multidimensionales, minería de datos y como complemento de microscopios y escáneres. También se han propuesto para navegar rápidamente en archivos de audio y video, y para crear un canal adicional en aplicaciones multimedia, lo que agrega una dimensión *mecánica* a los documentos. Una aplicación inmediata de esta idea podría darse en la presentación de productos en catálogos en línea (Hayward y otros, 2004).

Al mismo tiempo, todavía se presentan muchos retos en lo que atañe a estas interfaces. Con la tecnología actual, pueden surgir problemas de sincronización cuando se trabaja con muchos grados de libertad; por ejemplo, al manipular múltiples objetos a la vez en un ambiente virtual. Asimismo, los resultados no han sido completamente satisfactorios en entornos donde se requiere de muy alta sensibilidad, como por ejemplo en intervenciones quirúrgicas remotas o al manipular órganos vivos. Hay una actividad importante para identificar cuáles son los sensores apropiados y qué grado de fidelidad es el necesario para trabajar de manera confiable en este tipo de disciplinas (Robles-De-La-Torre, 2006).

6. Interfaces cerebro-computadora (ICC)

La simbiosis más completa que se puede imaginar entre un ser humano y un sistema de TIC es una interfaz que enlace las herramientas artificiales directamente con el sistema nervioso de su usuario. De esta manera se evita que un pensamiento tenga que ser intermediado por uno de los cinco sentidos del ser humano (oído, tacto, gusto, vista y olfato) para interactuar con el entorno tecnológico, y es posible derivar directamente “acciones de pensamientos” (Nicolesis, 2001). El cerebro, la central del sistema nervioso, es un sistema sumamente complejo, cuyo funcionamiento va siendo poco a poco comprendido por los neurocientíficos. En una representación excesivamente simplista, nuestros cinco sentidos captan señales del entorno (fotones, vibraciones del aire, moléculas, ondas de calor) que son convertidas en impulsos eléctricos y transportadas a través de terminales nerviosas hacia regiones del cerebro (como las cortezas visual y auditiva) para su interpretación. Al identificar las regiones que inter-

vienen en la percepción sensorial, se han podido diseñar prótesis para sustituir órganos dañados, que estimulan directamente las zonas correspondientes al sentido deseado.

Desde los años sesenta se demostró que los procesos cognitivos producían señales que podían ser captadas con un electroencefalógrafo, y a partir de entonces se consideró la idea de utilizar estas señales para controlar dispositivos. Sin embargo, fue sólo en años recientes, con los avances en las neurociencias, neurobiología, robótica y ciencias computacionales, que aparecieron los primeros resultados satisfactorios en el área de los ICC, o según su sigla en inglés BMI (*brain-machine-interfaces*) o BCI (*brain-computer-interfaces*) (Lebedev y Nicolelis, 2006) (Wolpaw y otros, 2001) (Schalk y otros, 2004). Gran parte de la investigación en interfaces cerebro-computadora ha estado dirigida a la atención de personas con alguna discapacidad física (Birbaumer y otros, 1999; 2000) y últimamente comienzan a explorarse las posibilidades de las ICC para el desarrollo de interfaces multimedia radicalmente revolucionarias, así como para la extensión de las capacidades humanas (Hughes, 2004).

Un factor importante a considerar es que el cerebro tiene una gran plasticidad. Se ha demostrado que la corteza auditiva de los macacos puede procesar información visual, y que estímulos eléctricos aplicados en la lengua, generados por la digitalización de una imagen por computadora, permiten “visualizar” dicha imagen (Bains, 2007). Bajo este principio, se empieza a evaluar la posibilidad de ampliar los sentidos para percibir, por ejemplo, campos magnéticos, señales infrarrojas o vibraciones ultrasónicas. Para quienes defienden estas ideas, el problema no se encuentra en los sensores sino en la manera en que la información captada pueda ser procesada; la manera más sencilla es llevando esta información a las regiones que ya han sido desarrolladas y que la mente puede interpretar “naturalmente”. De acuerdo con la forma en que interactúan con el cerebro, las ICC pueden clasificarse en tres categorías:

- *Invasivas*. Un arreglo de electrodos se implanta directamente en la materia gris del cerebro. La calidad de la interacción es muy alta, pero se corre el riesgo de causar infecciones, para lo cual se ha propuesto el uso de comunicaciones inalámbricas entre el sistema de control externo y el arreglo de electrodos implantados. Por otra parte, se corre el riesgo de sufrir rechazos del implante, y debido a la plasticidad del cerebro, los electrodos pueden dejar de funcionar.
- *No invasivas*. Captan la actividad neuronal mediante dispositivos externos y métodos indirectos. Si bien son las más seguras, el cráneo genera interferencia en las señales, por lo que es más difícil determinar el área específica de donde provienen. La técnica no invasiva más utilizada es la electroencefalografía (EEG). También se ha utilizado magnetoencefalografía (MEG), imágenes de resonancia magnética (fMRI), electrocorticografía (ECoG), tomografía de emisión de positrones (PET) y los electromiogramas (EMG). Aunque se ha avanzado mucho en ellas, su manipulación es muy complicada y requieren de muchas horas de capacitación (Lebedev y Nicolelis, 2006). Además, tienen un bajo desempeño en actividades continuas, como el poder desplazar un cursor.

- *Parcialmente invasivas.* Son un punto intermedio entre las dos anteriores: se colocan bajo el cráneo sin penetrar en el cerebro; así se reducen los riesgos de las invasivas y se produce una mejor calidad de señal que con las no invasivas.

Prótesis neuronales

Las neuroprótesis o implantes neuronales consisten en la integración de dispositivos electrónicos con el sistema nervioso (nervios o tejido neuronal) con el fin de aumentar, restaurar o modificar su funcionalidad (Hall, 2003) (Andersen y otros, 2004). A continuación se presentan algunos ejemplos del éxito que se ha logrado en el campo médico al aplicarlos a los sistemas óptico, auditivo y motor. En todos los casos, hay un gran optimismo por el nivel de sofisticación que podrán alcanzar estos dispositivos en los próximos años, sobre todo con la incursión de las nanotecnologías en este campo (Fiedeler y Krings, 2006):

Prótesis visuales. Se han desarrollado tres tipos: implantes en la corteza visual, implantes epirretinales e implantes subretinales. En los primeros, se inserta en la corteza visual primaria (V1) un arreglo de electrodos conectado a un sistema de control. Por otra parte, con una pequeña cámara se captan imágenes que son enviadas a una computadora para su digitalización, con lo que se establece en el sistema de control qué electrodos deben ser activados (Coisne, 2006; Maugh, 2002). La calidad obtenida es muy deficiente porque no se estimulan los demás centros de visión; además, se desconocen las consecuencias a largo plazo de este tipo de estimulación. Sin embargo, es una línea de investigación prometedora en la que existen varios proyectos en curso en distintas partes del mundo.

Los implantes *epirretinales* pueden utilizarse cuando el nervio óptico no está dañado. En ellos, el arreglo de electrodos se conecta a los axones del nervio en la retina. Estos electrodos reciben los impulsos eléctricos generados por la digitalización de la videocámara y es el nervio óptico el responsable de transportarlos hacia el cerebro (IIBN, *s/f* y Maugh, 2002). Los primeros implantes tenían un arreglo de 4 x 4 electrodos y permitían identificar formas y contornos. Los resultados reportados son sumamente alentadores porque el cerebro de los pacientes hace un gran trabajo en reinterpretar las nuevas señales visuales que recibe. Varios centros de investigación están siguiendo esta línea para producir circuitos con mucha mayor resolución basados en sistemas MEMS. Se considera que con un arreglo de 1.000 electrodos, los pacientes serán capaces de leer.

Los implantes subretinales no requieren de cámaras o procesadores externos. Se trata de un circuito sumamente delgado (25 micras) formado por un arreglo de fotosensores conectados a microelectrodos, que sustituyen la función de los conos y bastones dañados en la retina. Al ser estimulados por la luz que llega al ojo, los electrodos generan impulsos eléctricos que son captados por el nervio óptico. Se espera que con los avances en nanotecnología estos implantes mejoren sustancialmente en los próximos años (OCDE, 2006a).

Prótesis auditiva. Busca compensar la pérdida auditiva cuando la cóclea, o caracol, es incapaz de transformar señales auditivas en impulsos neuronales. Está formada por un micrófono que capta las señales sonoras y las pasa a un procesador de voz, el cual envía impulsos eléctricos a un arreglo de electrodos conectados al nervio auditivo (MED-EL). Con más de 80.000 trasplantes realizados exitosamente, es el tipo de neuroprótesis más difundida (Fiedeler y Krings, 2006), aunque está lejos de alcanzar el nivel de perfección del oído humano (Chorost, 2005). En realidad, al igual que los implantes retinales, el cerebro se adapta a la prótesis y aprende a interpretar las señales artificiales.

Prótesis neuromotoras (PNM). Su objetivo es reemplazar o reestablecer funciones motoras de personas discapacitadas. Sensan la actividad que se produce cuando se tiene la intención de realizar algún movimiento, y emiten señales hacia dispositivos externos (miembros artificiales, control de silla de ruedas) o hacia las extremidades del cuerpo para que la acción deseada se lleve a cabo. Entre las aplicaciones más exitosas de PNM, un sofisticado brazo biónico es activado con los impulsos eléctricos generados por *el deseo* de mover el brazo, y estos impulsos son tomados de las terminales nerviosas dirigidas al brazo faltante. Ya se ha logrado captar dos diferentes pensamientos de primates al mismo tiempo, que permitió a estos usuarios alcanzar y agarrar un vaso de jugo con un brazo robótico (Carmena y otros, 2006). Aunque de forma limitada, el brazo artificial también funciona como interfaz háptica: sensores en el brazo artificial han sido conectados a una zona de la piel bajo el pecho que permite a los pacientes percibir un impulso (RIC). Se espera que con esta forma de retroalimentación, superior a la obtenida únicamente por la vista, la plasticidad del cerebro asimile y acepte con mayor naturalidad la prótesis artificial (Lebedev y Nicolelis, 2006). Un pequeño microprocesador conocido como *BrainGate*, ha sido implantado exitosamente en la corteza motora primaria de pacientes voluntarios. Está formado por 96 electrodos y puede capturar miles de impulsos cerebrales relacionados con el movimiento voluntario. En una demostración, un paciente tetrapléjico logró controlar el cursor en una pantalla, acceder a su correo electrónico, y controlar el volumen del televisor mientras conversaba al mismo tiempo (Hochberg y otros, 2006).

ICC en áreas no médicas

Entre las primeras prótesis neuronales aplicadas sin fines médicos, se encuentran las utilizadas por el profesor Kevin Warwick en su proyecto *Cyborg*. El académico se hizo implantar un *chip* en el brazo, formado por 100 electrodos que captaban las señales eléctricas producidas al moverlo. El *chip* retransmitía estas señales hacia un brazo robótico que imitaba los movimientos detectados, y en una de sus demostraciones logró controlar el brazo robótico a través de internet.

Warwick ha creado una gran polémica por sus opiniones, consideradas en algunos sectores como radicales faltas de rigor científico (Kahney, 2000). Por ejemplo, el académico sostiene que las sensaciones de placer podrían interceptarse en las señales eléctricas que producen en el cerebro, almacenarse en algún medio electrónico y

reenviarse para estimular nuevamente el cerebro cuando se deseara reproducir la misma sensación. También ha sugerido que la comunicación verbal es lenta e imprecisa y que un mejor medio de comunicación sería el intercambio directo de pensamientos por medio de implantes cerebrales. Justifica sus investigaciones desde la línea dura de la inteligencia artificial, considera que en poco tiempo las computadoras tendrán capacidades superiores a las humanas, y que la única alternativa que el ser humano tiene como especie requiere de la expansión de sus capacidades mediante implantes biónicos.

En otro orden de ideas, se ha mostrado recientemente la capacidad de una ICC para controlar los movimientos de un robot. Un voluntario que portaba un casco con 32 electrodos, conseguía mover el robot hacia adelante, elegir uno de dos objetos y colocarlo en una de dos regiones. El robot estaba equipado con dos cámaras; cuando se presentaba el objeto deseado y la región donde debía colocarse, el cerebro del paciente reaccionaba con *sorpres*a, la cual era captada por el casco. A pesar de trabajar con señales bastante atenuadas, se pudo conseguir una tasa de éxito del 94% (Hickey, 2006). En el proyecto se pretende conseguir a mediano plazo que el robot pueda desplazarse por una habitación y manipule objetos de uso común. No es de sorprender que la industria militar esté bastante interesada en este tipo de aplicaciones.

Por su parte, la empresa Hitachi ha experimentado con una técnica llamada topografía óptica, que consiste en detectar cambios en el torrente sanguíneo por medio de señales infrarrojas para identificar actividad cerebral. Como prueba de concepto, en una demostración se utilizó la detección de actividad en la corteza frontal para controlar el movimiento de un pequeño tren eléctrico. Entre sus intereses a mediano plazo está el poder detectar y discriminar con mayor precisión la actividad cerebral para sustituir controles remotos y hasta teclados con este tipo de interfaz (Tabuchi, 2007).

Como parte del proyecto EHS (*extension of the human senses*), en la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos, la NASA, se trabaja con sensores EMG y EEG para interpretar el movimiento producido al escribir en un teclado virtual; las señales son enviadas directamente a la computadora. También se ha utilizado esta tecnología para hacer aterrizar un avión en un simulador de alto realismo, mediante las señales captadas por los sensores en el brazo del piloto cuando éste pretende tomar y manipular la palanca de control (Jorgensen, Wheeler y Stepniewski, 2000).

Otro proyecto que ha despertado mucho interés y cierta polémica ha sido la patente solicitada en abril de 2005 por la empresa Sony para registrar una técnica que, mediante radiaciones de frecuencias y patrones de ondas ultrasónicas, podría modificar la actividad neuronal con el fin de recrear en el cerebro sensaciones de los cinco sentidos: oído, tacto, gusto, vista y olfato. El portavoz de la compañía ha hecho énfasis en que es únicamente una propuesta teórica basada en experimentos paralelos y que no se han realizado prototipos para confirmar la factibilidad del proyecto (Horsnell, 2005). La idea de estimular células del cerebro aplicando campos magnéticos ya ha sido evaluada; el problema con esta técnica es que no se puede hacer incidir los campos en un grupo muy localizado de la corteza cerebral.

Rodney Brooks (2003), por su lado, ha planteado la posibilidad de crear un enlace cerebro-internet. Una vez que sea posible identificar cuando un usuario piensa en algún objeto concreto, sería posible hacer una búsqueda en internet sobre este objeto, y el usuario podría recibir una respuesta a su búsqueda inmediatamente.

c. Nuevos conceptos: computación ubicua, adaptrónica, realidad virtual y otros

En combinación con las otras operaciones de información que son posibles con las TIC, tal como la transmisión de información y su computación, los avances en las tecnologías de sensores e interfaces abren una gran variedad de posibles aplicaciones y servicios. Por su función de intermediar entre el mundo físico y el mundo virtual, estos sistemas complejos contribuyen a una simbiosis cada vez más cercana entre ambos. En esta sección se presentan algunas de estas aplicaciones bajo diferentes perspectivas.

1. Redes de sensores

Una red de sensores es un sistema distribuido de nodos interconectados que se coordinan para monitorear de manera automática condiciones físicas o ambientales en diferentes localidades, y que cubren un gran espacio (Bulusu y Jha, 2005). Una red de sensores conocida es el *sistema de posicionamiento global* (GPS). En este sistema se utiliza una constelación de 24 satélites en órbita sobre el planeta que transmiten en frecuencias de radio de microondas. Cuando se desea determinar la posición de un objeto, los receptores GPS captan las transmisiones de varios³⁶ satélites de la red y ocupan la diferencia en el tiempo de arribo de las señales para *triangular*³⁷ la ubicación de los receptores con precisión de algunos metros.³⁸ Este modelo está siendo replicado a escalas mucho menores, con redes de sensores dentro de una geografía limitada. La idea es muy similar y apunta a monitorear las realidades físicas de esta área determinada; en vez de satélites, la interconexión en redes más pequeñas se realiza mayoritariamente por medios inalámbricos, y se forman redes *ad-hoc* (Romer y Mattern, 2004).

Cada nodo en la red está compuesto de un microcontrolador, una fuente de energía, un transceptor de radio y elementos sensores, los cuales dependen de la apli-

³⁶ Se requiere de al menos cuatro satélites para obtener coordenadas de longitud, latitud y altitud.

³⁷ Los receptores GPS contienen las *efemérides* de la constelación de satélites, es decir, la posición relativa de cada uno en un momento determinado. Al comparar la posición de los satélites detectados y el retraso en las señales transmitidas, se determina fácilmente la posición del punto de medición en el espacio.

³⁸ Cuando los receptores del GPS se complementan con *indicadores electrónicos*, se obtienen orientaciones mucho más precisas e instantáneas que proporcionan una gran ayuda para el traslado en tierra, aire y agua. Además, los monitores de los mapas electrónicos se actualizan rápidamente. Cabe señalar que en los indicadores electrónicos se utilizan sensores magnéticos que están configurados para sensar el campo magnético de la Tierra a 0,6 Gauss.

cación que se desee dar a la red. Derivado de los primeros proyectos de redes de sensores, a estos nodos se les suele llamar *motes* o *smart dust* (Jacyna y Tromp, 2006). Cada mote es muy simple, pero con muchos de ellos organizados espontáneamente se puede obtener una visión más completa del entorno y superar las capacidades de complejos sensores especializados, mucho más onerosos (Jacyna y Tromp, 2006). Al mismo tiempo, su costo relativamente bajo permite tener una densidad grande de nodos, y formar una red de alta disponibilidad, porque esta puede reconfigurarse en caso de que algunos nodos se estropeen. Pueden conformar una topología plana en la que todos los nodos son iguales, aunque es más común que se organicen jerárquicamente. En el nivel inferior, los motes realizan un procesamiento básico sobre los datos colectados, colaboran con sus vecinos para discriminar información y sólo envían a nodos del siguiente nivel los datos relevantes (Glenn, Flanagan y Otero, 2006).

El desarrollo de redes de sensores inalámbricos fue inicialmente impulsada por la industria militar para la supervisión de territorios y seguimiento de objetivos, pero ya en la actualidad se utilizan en múltiples aplicaciones civiles, como el monitoreo del hogar, detección acústica, observación del ambiente, vigilancia de la frontera, detección sísmica, aplicaciones de salud, control del tráfico aéreo, naval y terrestre, entre otros (Salem y Mohamed, 2006). Existe una amplia gama de aplicaciones reportadas en la literatura (*The Economist*, 2007; Boriello y otros, 2007; Jacyna y Tromp, 2006): en puentes, edificios y carreteras para garantizar su integridad estructural; en boyas marinas, para evaluar en detalle el comportamiento de olas y mareas; en volcanes y glaciares para evaluar la evolución de fenómenos naturales, y prevenir eventuales desastres; en agricultura, para monitorear las condiciones de humedad y temperatura del aire y la tierra con enorme granularidad; en el estudio del comportamiento animal muy cerca de las especies y sin que éstas se alteren por la presencia humana (Martínez y otros, 2006); en educación, para obtener información del contexto en que se encuentra el usuario y adaptar los contenidos del material educativo de forma apropiada, proporcionando una forma de educación integral (Thomas, 2005); para monitoreo y supervisión de niños y personas de la tercera edad; para detectar tipos de vehículos sobre la base del patrón de vibración, sonido y otros parámetros; para detectar armas, agentes químicos, biológicos y nucleares; para la detección temprana de incendios y evaluación de su desplazamiento, entre muchos otros.³⁹

A medida que las redes de sensores mejoren su desempeño y se reduzca su tamaño, la demanda de consumo de energía y su precio, el rango de aplicaciones será

³⁹ Con el apoyo de Microsoft y de su tecnología SensorMap, en la Universidad de Harvard se está desarrollando el proyecto CiteSense para instalar una red de sensores en Cambridge, el primer proyecto que tiene una cobertura geográfica tan amplia. Se utilizan nodos robustos (computadoras con sensores) conectados a luminarias para evitar problemas con el consumo de energía. Inicialmente se utilizará para monitoreo de clima y contaminantes pero, al tratarse de un proyecto abierto, tiene el potencial de crecer enormemente. La idea central es que cualquier investigador pueda consultar los sensores a través de internet, y hasta tenga la posibilidad de cargar su propio programa de monitoreo en los nodos.

mucho mayor. Sin duda, estas tecnologías dominarán gran parte del mercado de sensores en el futuro cercano (Hauptmann, 2006). Sin embargo, primero es necesario sortear varios obstáculos inherentes a la tecnología actual, entre los que sobresalen: la limitación de recursos computacionales; el consumo de energía; la supervivencia en ambientes hostiles (Dekleva y otros, 2007); la falta de estandarización, e incluso desafíos en el plano jurídico porque, por ejemplo, no estaría claro en qué entornos se puede recopilar información –sobre todo privada– y quién sería el propietario de esta información (Culler y Mulder, 2004).

En cuanto al consumo de energía, se busca que los sensores tengan una gran autonomía, ya que puede ocurrir que se encuentren en lugares donde es imposible cambiar la batería. Una práctica común es operar con un ciclo de trabajo (*duty cycle*) muy reducido: el nodo hiberna la mayor parte del tiempo y sólo se activa cuando debe tomar una muestra o cuando debe participar en la comunicación con otros nodos. Este método de trabajo es muy común porque en general las variables a sensor, como la temperatura, o el nivel de contaminantes, varían lentamente. También se busca diseñar cuidadosamente la aplicación que se ejecuta en los nodos; por ejemplo, se consume mucha más energía al transmitir un mensaje que al realizar procesamiento local, por lo que, de ser posible, resulta conveniente tomar, preprocesar y almacenar temporalmente las muestras tomadas y enviar un compendio periódicamente, que enviar cada muestra tan pronto es tomada (Jacyna y Tromp, 2006). Una alternativa aún más atractiva, es diseñar nodos capaces de tomar la energía del medio. Un material piezoeléctrico puede convertir movimiento y vibraciones en carga eléctrica, aunque infortunadamente se produce muy poca energía de esta forma. Con la energía solar los captosres pueden resultar mucho más grandes que el sensor mismo para ser de utilidad, lo que hace descartar su uso en ambientes donde se desea contar con sensores micrométricos no invasivos. Con la prometedora tecnología de celdas combustibles (*fuel cells*) se produce energía a partir de materiales como metano o hidrógeno en vez de almacenarla, aunque es muy joven aún para poder explotar su potencial. También se ha trabajado en tecnologías capaces de transformar ondas electromagnéticas y campos magnéticos en energía. La mayor limitante aquí es la distancia reducida (de unos cuantos metros) entre el generador y los sensores.

Un reto importante para el éxito de las redes de sensores, es el disponer de estándares que permitan garantizar la interoperabilidad entre sensores y entre nodos. A nivel físico, en el sector de los sensores se han creado varias normas como HART (*highway addressable remote transducer*), BACNet y CIP (*common industrial protocol*), aunque recientemente el protocolo que más atención ha llamado es IEEE 802.15.4, un estándar para redes inalámbricas de área personal (WPAN) de un mínimo consumo de energía y tasas bajas de transmisión (Culler y Tolle, 2007). En las capas superiores, ZigBee, basado en IEEE 802.15.4, ha sido muy bien recibido para redes de sensores en aplicaciones de consumo, al igual que la norma SP-100 de ISA⁴⁰

⁴⁰ ISA es una organización compuesta de más de 30.000 empresas que promueve estándares para la automatización a nivel mundial.

para aplicaciones industriales. A un nivel superior, se ha propuesto considerar a los nodos de una red de sensores como *servidores* de información física y acceder a sus datos por medio de servicios *web*. Para ello, el consorcio OGC (*open geospatial consortium*) ha desarrollado esquemas para metadatos que describen al sensor y sus capacidades (*SensorML*), además de cómo captar y etiquetar con un sello de tiempo muestras para enviar a un procesador (*TransducerML*). OGC también está desarrollando estándares de servicios *web* para recopilación de datos, solicitud para recuperarlos y condiciones de alerta (Los, 2006).

La elaboración de aplicaciones para redes de sensores se ha visto altamente favorecida con la aparición de la plataforma y sistema operativo de código abierto TinyOS,⁴¹ desarrollado en la Universidad de California en Berkeley, en cooperación con la firma Intel. El sistema, orientado a eventos, es altamente modular y puede operar con severas restricciones de memoria, propias de una red de sensores (Dekleva y otros, 2007). También se ha desarrollado el *software* TinyDB, que permite explotar la red de sensores como si se tratara de una base de datos.

Los investigadores empiezan a expandir las redes de sensores hacia grandes áreas al integrar los sensores a dispositivos existentes como el automóvil y el teléfono móvil. Estas redes, llamadas *mobiscopes*, permiten obtener un área de monitoreo mucho mayor, capturar una enorme cantidad de datos, y todo ello de forma transparente para los usuarios y portadores de los sensores (Abdelzaher y otros, 2007). Es tal vez el primer paso hacia la computación que penetra en todas las facetas de la vida diaria y que está a punto de convertirse en realidad.

2. *Cómputo ubicuo*

El cómputo ubicuo o penetrante sugerido inicialmente por Weiser (1991), es un ambiente en el que las personas y los objetos se encuentran permanentemente interconectados (OCDE, 2006a). Se caracteriza por el uso continuo de redes de sensores y dispositivos de cómputo que están integrados en el mundo que nos rodea (Michaheles y Schiele, 2003). En estas redes, la interacción entre el mundo real y la computadora será mucho más natural, y la configuración de dispositivos y el acceso a información y la infraestructura de red serán transparentes. Las tecnologías inherentes deberán ser diseñadas tomando como punto central al usuario y a los servicios que ofrecerán (Culler y Mulder, 2004). Algunos investigadores la han definido como la tercera ola de la computación, seguida de la popularización del cómputo por medio de la computadora personal, y del uso de las grandes computadoras centrales (*mainframes*) de los primeros años (Medley, 2007).

En el cómputo ubicuo, la interoperación pasa de ser explícita a implícita y, con el desarrollo de sistemas como los de identificación, los que giran en torno a la localización (LBS, *location-based systems*), y los de información geográfica (GIS, *geographic information systems*), se abre la puerta a una gama de servicios personaliza-

⁴¹ Para obtener información sobre el sistema consúltese <http://www.tinyos.net/>

dos disponibles en cualquier lugar, en cualquier momento. Un ejemplo muy citado de cómputo ubicuo es un sistema que reconoce la presencia de una persona en cierta localidad por medio de sensores embebidos en su ropa. Al llegar a su casa u oficina, las cerraduras se abren, y la luz y temperatura se adecuan a sus gustos.

Tanto en Japón (con el proyecto uJapan) como en República de Corea (bajo la Estrategia IT839) se han lanzado iniciativas muy concretas para promover el desarrollo y la propagación de las redes ubicuas. Además, en la Unión Europea se ha impulsado el proyecto *disappearing computer* para investigar de qué forma las TIC pueden ser diluidas en los objetos y actividades cotidianas de manera que puedan mejorar las condiciones de vida. En la ciudad de Songdo, en la República de Corea, se está desarrollando un ambicioso proyecto llamado *ciudad ubicua* que consiste en dotar de conectividad a todos los elementos imaginables dentro de ese centro urbano. Por ejemplo, los ciudadanos estarán dotados de llaveros inteligentes que, además de proporcionar acceso a sus hogares, funcionarán como monederos electrónicos, tarjeta de préstamo en bibliotecas y para utilizar las bicicletas municipales. Se trata de un enorme laboratorio para evaluar estas tecnologías e identificar nuevos usos y modelos de negocios (*The Economist*, 2007).

Si bien no se ha llegado al modelo de cómputo invisible y acceso transparente, cada día aparecen más aplicaciones y servicios originales que irán delineando la ruta hacia el cómputo integral, que abre nuevas posibilidades en modelos de negocios en diferentes ámbitos.⁴² También existe la idea de implantar identificadores RFID (identificación por radiofrecuencia, o *radio frequency identification* en inglés)⁴³ bajo la piel para dar acceso a personal restringido en áreas de alta seguridad, para control de pacientes en hospitales y, con gran polémica, se ha propuesto en el Congreso de Estados Unidos para el control del ingreso de los inmigrantes.⁴⁴ En el proyecto *Just-for-us* se utilizan redes de sensores para generar una capa de datos sobre las personas, los sitios y las actividades que convergen en un lugar determinado con el fin de explorar las posibilidades de cómputo ubicuo en ambientes urbanos. Esta información se

⁴² Por ejemplo, algunas compañías de seguros del Reino Unido han definido un tipo de póliza para automóviles cuyo precio está determinado en función del horario de conducción, las rutas elegidas y el estilo de manejo, parámetros que son monitoreados a través de redes de sensores. Por otro lado, algunas empresas han decidido ofrecer sus autos a personas con un historial de crédito mediocre. Si el cliente se retrasa en el pago, se puede detectar dónde se encuentra el auto y enviar a alguien para que bloquee el sistema de encendido del motor.

⁴³ Una etiqueta RFID es un dispositivo pequeño que puede ser adherida o incorporada a un producto, animal o persona. Contiene antenas para recibir y responder a peticiones por radiofrecuencia desde un emisor-receptor RFID. Las pasivas no necesitan alimentación eléctrica interna, mientras que las activas sí lo requieren. Una de las ventajas del uso de radiofrecuencia (en lugar, por ejemplo, de infrarrojos) es que no se requiere visión directa entre emisor y receptor.

⁴⁴ En Barcelona y Rotterdam, un bar ha propuesto implantar para su clientela VIP, un identificador RFID bajo la piel para permitir el acceso a ciertas áreas, y para realizar los pagos automáticos de los consumos. En realidad, han sido muy pocas las personas que han aceptado el implante, pero demuestra lo que la tecnología puede lograr en la actualidad.

presenta en el navegador de un teléfono móvil, con el fin de que el usuario tenga una mejor adaptación física y social (Kjeldskov y Paay, 2006). Algunos investigadores consideran que la publicidad será una de las principales aplicaciones del cómputo ubicuo en el mediano plazo (Medley, 2007).

Por supuesto, para que el cómputo ubicuo se haga realidad, habrá que resolver los problemas inherentes a las redes de sensores. Además, los servicios implementados deben ser capaces de respetar y servir a los principios y valores que la sociedad contemporánea sostiene. Una preocupación recurrente tiene que ver con la privacidad de los usuarios y la seguridad de la información. Estos sistemas se caracterizan por la autonomía de sus componentes, los cuales pueden recopilar continuamente información (que se almacena de manera indefinida) y que entran y salen, lo cual complica severamente el establecimiento de políticas formales de privacidad entre ellos (Sackmann, Strüker y Accorsi, 2006; Subirana y Bain, 2006).

3. Computadoras para vestir

El concepto de computadora para vestir (*wearable computer*) está estrechamente vinculado con las redes de sensores y con el cómputo ubicuo. Se refiere a sensores y nodos de procesamiento muy pequeños que se portan en el cuerpo (como se lleva un sombrero o unos anteojos), con los que se interactúa con total libertad y prácticamente de manera transparente; así se busca la integración de procesamiento de información con el entorno del usuario. Se han utilizado para estudiar comportamientos sociales en la vida diaria (Mann, 1998), para monitoreo en sistemas de salud, para la concepción y desarrollo de nuevas interfaces, y en la industria militar.

Existe una importante actividad en esta área encaminada a explorar, en el mediano plazo, esquemas de trabajo colaborativo y de interacción personal. Sin embargo, en el corto plazo los avances en cómputo para vestir se están manifestando en la aparición de una cantidad sorprendente de nuevos artefactos (Broersma, 2002). Se han realizado pruebas de concepto en telas inteligentes, capaces de modificar su color en función de la luz externa y su textura en función de la temperatura. Por medio de etiquetas RFID, se puede instruir a la lavadora sobre el ciclo ideal de lavado, y se puede tener incorporada una pantalla flexible con tecnología de red inalámbrica para el despliegue de información. En el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) de Estados Unidos se han desarrollado “parches inteligentes” conformados por unidades funcionales (sensores, transmisores, pantalla, batería) que se adhieren a textiles, y pueden interconectarse con un velcro conductor, para proveer una gran variedad de funcionalidades. Por ejemplo, en un bolso, pueden detectar si no se olvidan objetos como las llaves, el monedero o el teléfono móvil. Por supuesto, estos objetos tendrían algún tipo de identificador, muy probablemente, etiquetas RFID.

Se ha fabricado un chaleco con 16 motores de vibración en la espalda para el ejército de Estados Unidos; los motores pueden capturar señales inalámbricas con comandos simples que generan patrones particulares de vibraciones. Estos chalecos pueden ser utilizados en situaciones en las que las comunicaciones por radio están comprometidas, se requiere de total silencio o el soldado tiene las manos ocupadas en

otra actividad (Simonite, 2007a). Sería muy sencillo adaptar este chaleco a aplicaciones civiles, como para alertar al usuario sobre la cercanía de sitios de interés, de la presencia de amigos cercanos, o de alguna situación de riesgo. También se han desarrollado chalecos para bomberos con nodos que pueden enviar información sobre la posición del personal, la intensidad del incendio y su dirección.

Las empresas Nike y Apple han comercializado el primero de una serie de productos de apoyo a los corredores llamado *Nike+iPod Sport kit*. Un sensor electrónico en la suela del calzado deportivo se enlaza de forma inalámbrica a un reproductor *iPod*, el cual puede proporcionar al corredor información sobre su desempeño: distancia recorrida, cadencia o tiempo transcurrido, así como adaptar la selección musical al ritmo del corredor. En la firma IBM se ha desarrollado una computadora personal sumamente compacta que puede colgarse al cinturón y que posee la capacidad suficiente para poder ejecutar un sofisticado programa de reconocimiento de voz. También se ha elaborado el prototipo de una computadora en un reloj de pulsera que funciona con el sistema operativo Linux. Al mismo tiempo, se anticipa la entrada de una serie de teléfonos inteligentes con características de computadores personales, de empresas tan importantes como Apple, Sony y Nokia (Markoff, 2007).

4. *Internet de las cosas*

Ante la llegada de estos *objetos inteligentes* se añade una dimensión adicional al mundo del cómputo ubicuo, desde cualquier lugar, en cualquier momento y, además, por cualquier objeto. La internet de las cosas es un término que se refiere a la capacidad de los objetos de comunicarse directamente entre sí (M2M, *machine to machine communication*) (*The Economist*, 2007).

Como motores de esta visión se encuentran RFID para la identificación de objetos; las redes de sensores para detectar cambios en el ambiente y en los objetos; los objetos inteligentes para aumentar las capacidades de la red; y las micro y nanotecnologías para producir dispositivos minúsculos que efectivamente pasen desapercibidos en el entorno. En relación con este punto, la compañía japonesa Hitachi ha logrado fabricar circuitos RFID que miden 0,05 x 0,05 mm, casi lo mismo que una mota de polvo. Por su parte, la empresa HP ha producido dispositivos con un procesador, 1MB de memoria, módem y antena de comunicaciones, de un tamaño de 2 x 4 mm.

Se estima que la comunicación entre dispositivos se multiplicará sustancialmente en los próximos años. Representantes de la empresa Nortel consideran que entre 2009 y 2011 el tráfico entre dispositivos será mayor que el producido por los humanos, a medida que más sensores, sistemas de seguridad, cámaras, autos y demás objetos se conecten a internet (*The Economist*, 2007). Bajo este escenario, internet será la interfaz entre el mundo virtual y el real, entre los usuarios y los objetos. Pero esta transición representa un gran reto para la red actual, porque el intercambio de información entre estos objetos tiene características y requerimientos muy distintos a los intercambios de las aplicaciones tradicionales (Raychaudhuri y Gerla, 2005).

En la actualidad, la mayoría de los sistemas de redes de sensores se conforman como constelaciones de dispositivos inalámbricos en sus propias redes *ad-hoc* que se

conectan a internet a través de un solo nodo (el *gateway*). Sin embargo, para muchas aplicaciones existe la tendencia a contar con sistemas en los que a todos los sensores, o a una gran parte de ellos, se pueda acceder directamente. Esto exige nuevas formas de direccionamiento, localización, y protocolos más ágiles de comunicación, lo que ha motivado una seria reflexión sobre las formas de hacer evolucionar internet, que incluye la posibilidad de crear una nueva infraestructura de red, completamente radical, en la que se tomen en cuenta desde el principio las necesidades de comunicación de millones de nodos inalámbricos y móviles (Raychaudhuri y Gerla, 2005).

5. Adaptrónica

La fusión de las tecnologías de *sensores* y las funciones de *actuadores* en los *materiales inteligentes* ha dado como resultado una nueva tecnología: *adaptrónica* o *materiales adaptables*. La idea de esta nueva tecnología es utilizar materiales inteligentes que funcionen como sensores para que detecten –por ejemplo– cambios en el medio ambiente como presión, temperatura, humedad, y puedan responder a estos cambios de manera controlada por medio de actuadores (Utku, 1998).

En *adaptrónica*, el *sensor* y el *actuador* se encuentran integrados en una misma estructura. El sensor detecta cambios en su entorno, y envía esta información al sistema de control, que produce una señal de respuesta y la remite al actuador. Este dispositivo es, finalmente, el encargado de realizar la acción encomendada. Un ejemplo lo representa el uso de cristales líquidos para regular la luz del sol en una habitación. Las ventanas de cristal líquido *sensan* la cantidad de luz que les llega y sus moléculas se orientan en una misma dirección, lo que permite parcialmente el paso de la luz. Dependiendo de la orientación, la ventana puede tomar diferentes tonalidades, desde transparente hasta opaca. Esta aplicación permite hacer más eficiente el consumo de energía en los edificios, ya que al regular el paso de luz permite usar de una manera más inteligente la iluminación, así como los sistemas de calefacción y aire acondicionado (Lee y otros, 2006). Los cristales de los lentes fotocromáticos representan otra aplicación de los materiales adaptables, ya que se oscurecen con el sol y se aclaran en la sombra.

Los materiales adaptables tienen, además, la característica de que pueden trasladar ciertos parámetros físicos a otros parámetros físicos. Un material piezoeléctrico, por ejemplo, puede responder a un campo eléctrico modificando su forma, pero también puede responder a una deformación mecánica mediante la producción de una señal eléctrica. En un caso funciona como sensor y en otro como actuador (Hanselka, 2006). El objetivo de la adaptrónica es reunir en un mismo material ambas funciones, *sen*sar y *actu*ar, que es lo mismo que ocurre en nuestro cerebro cuando percibimos algo de nuestro entorno –percibimos con nuestros sentidos– y actuamos en función de la evaluación de esa muestra. Por ejemplo, detectamos un objeto que vibra cerca nuestro y le ponemos una mano encima para detener la vibración.

En la actualidad, el sistema de control que procesa la información enviada por el sensor y transmite la señal al actuador generalmente es externo al material. Sin embargo, el objetivo de la adaptrónica es lograr que esta unidad de control sea parte del

mismo material en el futuro cercano. En el instituto de investigación Fraunhofer, en Alemania, se está trabajando en la elaboración de un material adaptable diseñado para prolongar la vida de los componentes del automóvil y prevenir accidentes. Un sistema de sensores evalúa los diferentes componentes y activa una alarma en caso de que alguno de ellos detecte algún desperfecto o esté pronto a fallar (Müller, 2004). Recientemente, en la empresa *Siemens* se ha desarrollado un *material adaptable* –fibras piezoeléctricas– que se incorpora al asiento del vehículo para que informe sobre el peso del ocupante al dispositivo que controla la operación de las bolsas de aire. Esta información permite al dispositivo actuar de manera inteligente en caso de un posible accidente, al inflar de manera adecuada las bolsas para que amortigüen el impacto con el ocupante. Los expertos en adaptónica, indudablemente, apuestan por un mundo con materiales inteligentes.

6. Cognición aumentada

En la actualidad, una persona invierte cada vez más tiempo interactuando con dispositivos computacionales y se ve inundada por volúmenes de información cada vez mayores. Con el advenimiento de las redes de sensores y el cómputo ubicuo, esta exposición a datos e información seguirá aumentando. Sin embargo, el ser humano tiene un límite en sus capacidades cognitivas (memoria, aprendizaje, comprensión, atención, capacidad de juicio), determinado por diversos factores como la fatiga, el ambiente, la complejidad de las tareas y el nivel de estrés. Por medio de los sistemas de cognición aumentada (*augmented cognition*) se exploran estrategias para filtrar la información y presentarla al usuario en el momento y a través del canal más apropiado, tratando de optimizar su capacidad de asimilación y de toma de decisiones (Schmorrow y Kruse, 2004).

Hay un amplio rango de parámetros que pueden ser utilizados para evaluar el estado del usuario: la actividad cerebral con técnicas no invasivas (EEG, fMRI), cambios en el volumen de irrigación y oxigenación de la sangre, sudoración, dilatación de las pupilas, ritmo cardiaco, resistividad de la piel, parpadeo, antecedentes de desempeño en tareas similares, frecuencia de teclado, movimiento del ratón, y otros. No obstante, el reto principal no está en los sensores sino en la interpretación correcta del estado del usuario, y en seleccionar la estrategia adecuada para apoyarlo. En concreto, el sistema debe ser capaz de detectar saturación en alguna de las áreas cognitivas antes mencionadas, y elegir una estrategia adecuada, como limitar la información, utilizar algún canal alternativo (visual, auditivo, táctil), o recalendarizar actividades.

En el departamento de defensa de Estados Unidos ha habido mucho interés en estos sistemas, y se espera que por medio de ellos la capacidad en el manejo de información de personas que realizan actividades con altos niveles de estrés, pueda aumentar en un orden de magnitud.⁴⁵ También existe un gran interés en desarrollar

⁴⁵ En CogPit, uno de sus proyectos financiados, se simula la cabina de un avión de guerra. Cuando el sistema detecta que el piloto se acerca a un nivel de saturación, se cubre el tablero con una “niebla” tras-

sistemas de cognición aumentada para aplicaciones civiles. La industria automotriz cuenta con sensores que monitorean el movimiento de cabeza, la tasa de parpadeo y la apertura del iris para determinar si el conductor empieza a dar signos de distracción o fatiga. Con una interfaz más proactiva, se podría encender la radio, modificar el tipo de música, aumentar los niveles de oxigenación o redistribuir indicadores en el tablero (en el parabrisas, por ejemplo), para recuperar la atención del conductor.

Los sistemas de cognición aumentada tienen un gran potencial para los servicios individualizados de educación y entrenamiento. Un tutor inteligente puede detectar el nivel de atención, capacidad de retención y grado de avance de un estudiante y plantear dinámicas o actividades alternas (modificar la complejidad de la actividad, proponer una videoconferencia con otros estudiantes, activar un archivo de video, despertar un avatar, modificar el intercambio de información) para mantener un nivel óptimo de desempeño (Simonite, 2007b).

En las grandes empresas de la industria del *software* se ha trabajado en proyectos de cognición aumentada. Por ejemplo, expertos de Microsoft han desarrollado un sistema que intercepta nueva información dirigida al usuario (correos electrónicos, sesiones de diálogo en línea, llamadas telefónicas) y decide, sobre la base de la prioridad de la información y la actividad realizada por el usuario, si permite o bloquea la información entrante. El sistema no requiere de sensores especializados, evalúa parámetros como frecuencia de tecleado, ruido ambiental, número de ventanas abiertas y contenido, hora del día, si se está desplazando información, y contenido del calendario (*The Economist*, 2006b).

7. Conciencia sobre el contexto

En un ambiente de cómputo consciente del contexto (*context aware computing*), el sistema es capaz de identificar el entorno del usuario para adecuar y ofrecerle servicios personalizados. Para el sistema, el contexto es toda la información que permita identificar la situación del usuario, como su localización, su relación con los objetos circundantes y con otras personas, la actividad que realiza y su estado de ánimo, entre otros.

Un ejemplo sencillo de conciencia del contexto sería una interfaz para teléfono móvil capaz de decidir si el usuario se encuentra en una situación en la que puede ser interrumpido para recibir una llamada o si es mejor canalizarla al buzón. Asimismo, podría ofrecer información de interés para el usuario en su contexto. Por ejemplo, si se está desplazando en auto, podría activar automáticamente un servicio de información de tráfico; si está próximo al horario de comer, podría proponer restaurantes cercanos que coincidan con los gustos del usuario; si detecta que se encuentra en una

lúcida y se resaltan únicamente los indicadores más importantes o se forman grupos de indicadores apropiados para atender la tarea más prioritaria. Cuando los sensores indican que el piloto regresa a niveles normales de desempeño, la niebla empieza a disiparse (*The Economist*, 2006b).

librería, podría sugerir resúmenes en audio de libros y descargarlos si éstos se encuentran en formato electrónico.

Estos escenarios requieren que el sistema tenga un apropiado conocimiento del usuario, de su historia y sus preferencias, de su actividad y del entorno. Se han tenido grandes avances en la identificación de las preferencias del usuario en contextos específicos, como ocurre en la tienda virtual *amazon.com*. Extender los intereses y el comportamiento del usuario a un entorno global, es mucho más complejo y demanda conocimientos de ingeniería de sistemas, inteligencia artificial, psicología, sociología, entre otras disciplinas. Con las tecnologías actuales, la brecha entre lo que un usuario entiende por contextual y lo que pueda interpretar la computadora es muy grande, por lo que es importante integrar al usuario en el diseño de estos sistemas y permitirle decidir qué acciones tomar (Christensen y otros, 2006). Debido al conocimiento que el sistema puede poseer sobre el usuario, también es necesario definir un marco regulatorio que proteja la privacidad.

8. Realidad virtual

El concepto de realidad virtual se ha vuelto bastante difuso, porque bajo este rubro se han clasificado los más diversos sistemas: desde pequeños ambientes simulados (juegos de computadora, comunidades virtuales y otros) con los que el usuario interactúa a través de interfaces convencionales, hasta sofisticados entornos de inmersión total. Si bien los llamados mundos virtuales son cada vez más populares⁴⁶ y se han convertido en todo un fenómeno social, estos sistemas quedan fuera del alcance del presente estudio. Se incluyen solamente los sistemas inmersivos totalmente simulados, y aquellos en los que los modelos virtuales se integran con el entorno real.

Bajo esta precisión, los sistemas de realidad virtual permiten la interoperación con un ambiente (real o imaginario) simulado por la computadora, y producen una sensación de inmersión. Se ha trabajado bastante en la interfaz visual de estos sistemas por medio de pantallas gigantes que cubren los muros de una habitación, y mediante el uso de video-cascos con visión estereoscópica que ofrecen imágenes en tres dimensiones, y gráficos con un alto grado de realismo. Una experiencia de inmersión total también requiere, al menos, de interfaces de audio envolvente e información sensorial a través de interfaces hápticas.

Estos sistemas han sido utilizados en muy diversas áreas como el modelado de moléculas en medicina; la capacitación en tareas especializadas con sofisticados sistemas de simulación; en ingeniería, para diseño de componentes, y en arquitectura, para visualizar espacios. El ejército de Estados Unidos utiliza ambientes inmersivos de realidad virtual para entrenamiento de soldados y, últimamente, también para atender a aquellos que presentan estrés postraumático (Havenstein, 2007). Una de las aplicaciones con más potencial es su uso para mejorar la educación, dando un nuevo

⁴⁶ Consúltese, por ejemplo, <http://www.virtualworldsreview.com>

sentido a la diferenciación entre educación virtual *versus* educación “cara a cara”. El ambiente de un aula de clase y la interactividad entre todos sus integrantes significa una mejora sustantiva en comparación con los modelos tradicionales de educación a distancia (Bailenson y otros, 2008) (Okita, Bailenson y Schwartz, 2007). Las herramientas digitales incluso pueden ofrecer posibilidades inasequibles en un aula física, como por ejemplo el “sentar” a cada uno de los alumnos en un lugar exclusivo enfrente del profesor o prestar notas y anécdotas individualizadas según los intereses particulares de los alumnos. Estas mejoras pueden contribuir a que el desempeño y la efectividad del proceso de aprendizaje sea más elevado que en un entorno físico. Por ejemplo, en Haití, un país que por lo general no es asociado a iniciativas como las aplicaciones de realidad virtual, se está instrumentando un proyecto denominado “*andar en los zapatos digitales de otra persona*”.⁴⁷ El usuario puede experimentar cómo se siente ser discriminado o excluido por estar infectado con VIH, que es un problema grave en esa nación. El hecho de ver la realidad a través de los ojos virtuales de otra persona también es aplicado también para luchar contra el racismo o para estabilizar la democracia.

Los recientes avances en diseño de micropantallas y sistemas de rastreo de movimiento para video-cascos, así como la capacidad de procesamiento de las computadoras personales actuales, han permitido que aparezcan sistemas de realidad virtual relativamente económicos para videojuegos y aplicaciones personales. Sin embargo, sigue resultando sumamente costoso y complejo crear ambientes virtuales con muy alta fidelidad. Por eso, han empezado a surgir centros especializados que rentan servicios y sistemas sofisticados de realidad virtual, facilitando así el acceso a esta tecnología.

9. Realidad aumentada

En un ambiente de realidad aumentada, se superponen al mundo real información o animaciones generadas por computadora, con lo que se mejora la apreciación de los usuarios. Los sistemas más sofisticados deben adaptarse a la perspectiva del usuario y están compuestos de pantallas video-cascos o gafas, que son mecanismos muy precisos para seguir el movimiento de los ojos y la cabeza con el fin de sincronizar las imágenes superpuestas con el ambiente exterior; de lo contrario, la sensación resultante es de imágenes no referenciadas que “flotan” en el entorno (Fischer y otros, 2007). Existen básicamente dos tipos de visores: los primeros consisten de cámaras que graban un video al que se le agregan gráficos e información (*video see-through*); en los otros se emplean pantallas traslúcidas a través de las cuales puede percibirse el mundo exterior con las imágenes superpuestas (*optical see-through*). Estos últimos

⁴⁷ L'Ecole Supérieure d'Infotronique d'Haiti, Project InnoRev Haiti, http://www.esih.edu/innorevhaiti/presentationppt/introinnorevhaiti_files/frame.htm
http://www.pancap.org/doc_dl.php?id=143&PHPSESSID=bb736a921bec0d891896402c1c463ee3

dan una mayor sensación de integración con el ambiente pero es más difícil hacer coincidir las animaciones con el mundo exterior.

El espectro de aplicaciones para ambientes de realidad aumentada es inmenso y se está desarrollando un número creciente de prototipos que exploran su potencial. Por ejemplo, en entornos de manufactura y mantenimiento, se podrían superponer guías de instalación, números de parte y manuales informativos a las piezas del producto a instalar o a reparar sin tener que distraer al operador en consultar un manual. Un prototipo de realidad aumentada ha sido desarrollado para observar animaciones del feto en ultrasonidos, en biopsias de pecho, o en laparoscopias para distinguir elementos que no podrían ser observados de otra forma (UNC). En recorridos turísticos y visitas a museos, estos sistemas podrían servir como guías personales.

En el proyecto HARP (*hand-held augmented reality project*), financiado por el Departamento de Educación de Estados Unidos, se exploran formas de incorporar ambientes de realidad aumentada en la docencia. En una primera etapa, los profesores e investigadores involucrados en el proyecto se han concentrado en el desarrollo de habilidades matemáticas y literarias a través de juegos de situación simulados (Devaney, 2007). Para evaluar el potencial de estas tecnologías en la vida cotidiana, en el laboratorio de medios del MIT se han establecido diversos ambientes apoyados con realidad aumentada. En uno de ellos, los electrodomésticos en una cocina colaboran de distintas formas con el usuario. El lavavajillas despliega una etiqueta indicando si está vacío o lleno y si los platos están limpios o sucios, mientras que el refrigerador indica si se han terminado algunos productos o si están a punto de caducar.

Una aplicación de realidad aumentada que ha tomado un renovado interés, es la llamada teleinmersión. Con ambientes de visualización en tres dimensiones de gran realismo, sonido ambiental envolvente, redes de sensores, interfaces hápticas y redes digitales de muy alta velocidad, se empieza a vislumbrar la posibilidad de contar con sistemas a través de los cuales dos o más individuos se puedan comunicar en tiempo real en un ambiente virtual compartido (Chinoy, 2002). A diferencia de las videoconferencias convencionales, estos sistemas permiten que la gente se desplace dentro de su entorno, comparta un ambiente en tres dimensiones y hasta pueda manipular conjuntamente objetos virtuales (Halan, 2003; Schreer, Kauff y Sikora, 2005).

Estas aplicaciones necesitan una gran capacidad de procesamiento y de ancho de banda, debido a la cantidad de información que se produce. Se estima que se precisa de enlaces de al menos 1.2 Gbps para poder crear un ambiente teleinmersivo de calidad (Halan, 2003). Sin embargo, gracias a los avances sostenidos que se han venido dando precisamente en las capacidades de procesamiento y de transporte en los últimos años, es de esperar que estos sistemas aparezcan con mayor frecuencia para aplicaciones médicas, en las empresas y hasta en aplicaciones de consumo.

d. Conclusiones

El elemento central del paradigma digital es el diseño de nuevas formas de interoperación entre el usuario y los sistemas de cómputo que estarán cada vez más integrados a su entorno. En el sector de la informática han adquirido una relevancia creciente los

conceptos de diseño de sistemas centrados en el usuario, en los que el diseño de la interfaz entre el usuario y el sistema juega un papel primordial. Las tecnologías aquí presentadas, como el diseño de dispositivos de visualización, las interfaces hápticas, los sensores y sistemas capaces de reconocer gestos y hasta emociones, permiten una interoperación más natural, eficiente y transparente con los sistemas computacionales.

Las tecnologías de identificación, la miniaturización o las redes de sensores nos han acercado más que nunca a la visión de cómputo ubicuo, con su potencial para ofrecer una gama inimaginable de nuevos servicios. Los sensores e interfaces entrelazan el mundo físico cada vez más cerca con el mundo virtual. Los biosensores son de creciente importancia en la actualidad porque permiten convertir señales bioquímicas en señales eléctricas y este *punte* permite acercar, mediante una interfaz, los sistemas biológicos y los sistemas de almacenamiento y análisis de información. Para poder interactuar con un sistema biológico, el biosensor tiene que ser biocompatible, y por eso se deben elaborar materiales inteligentes, cuyas propiedades se puedan modificar a nivel molecular por medio de técnicas desarrolladas con la nanotecnología. Por ejemplo, mediante la fabricación de transistores moleculares utilizables en biosensores, se pueden producir los amplificadores necesarios para convertir una señal biológica en una medida cuantificable. La nanotecnología y los sistemas biológicos cada vez están más relacionados.

Es importante observar también que las nuevas tecnologías y en particular las que involucren a organismos *vivos*, como los biosensores, no serán ajenas a controversias éticas y morales. Toda nueva tecnología viene, generalmente, acompañada de un conjunto de predicciones negativas, que aunque no resulten ciertas, tienen la suficiente fuerza social como para frenar nuevos avances. En este sentido, Greenfield (2006) ha propuesto cinco principios que deben cumplir los sistemas de cómputo ubicuo: por omisión, deben ser configurados para proteger al usuario; aunque “invisibles”, deben manifestarse para que el usuario pueda decidir si quiere interactuar con ellos; sus servicios no deben avergonzar o humillar a los usuarios; no deben introducir complicaciones innecesarias, y deben respetar el tiempo de los usuarios, y permitir que el usuario renuncie a interoperar con ellos, cuando lo desee.

Es importante definir políticas públicas e iniciativas nacionales y regionales para crear la infraestructura necesaria y llevar los beneficios de estas tecnologías a la sociedad en su conjunto, incidiendo en servicios comunitarios, médicos y educativos, entre otros. No proceder de esta manera conlleva el riesgo de acentuar la brecha digital.

Con el despliegue de redes de sensores y el crecimiento sostenido en el número de dispositivos con capacidad de interconexión (móviles, consolas de juego, dispositivos inteligentes), internet enfrentará grandes retos y se anticipa que la red atravesará fuertes transformaciones en los próximos 10 a 15 años (Raychaudhuri y Gerla, 2005). Ya existen en la actualidad serias iniciativas para crear una red alterna que tenga como prioridad el acceso a miles de millones de dispositivos móviles e inalámbricos.

En la búsqueda de interfaces más naturales para el ser humano, las ciencias cognitivas han adquirido un papel muy relevante. Hoy se reconoce que, en muchas ocasiones, los desafíos para crear sistemas que no sean percibidos como disruptivos, están más vinculados con los procesos cognitivos, y con las ciencias sociales, que con las li-

mitaciones de la tecnología. Los avances en las ciencias cognitivas, en general, y en las neurociencias en particular, han sido potenciados por –y se han beneficiado de– la atención que han adquirido las interfaces cerebro-computadora. Estas áreas se encuentran aún en una etapa experimental y se desconoce su verdadero potencial.

Las prótesis neuronales y los implantes cerebrales en aplicaciones médicas han sido recibidos con interés por el mundo científico, y el uso de estas tecnologías para extender las capacidades humanas ha sido la fuente de enormes debates filosóficos, legales, sociológicos y tecnológicos. Los proponentes más aventurados de estas tecnologías sostienen que se podrá recurrir al uso de implantes cibernéticos para incorporar funcionalidades como el aumento de la memoria, la comprensión de varios idiomas, visión nocturna, capacidad auditiva ultrasónica y comunicación cerebro a cerebro, entre otras. Hay una actividad importante en centros de investigación privados, y también para la industria militar, de la que se ignora el grado de avance alcanzado. Al final, la aceptación de estas nuevas tecnologías puede interferir con la preservación de la definición actual de integridad y dignidad humanas.

12. TRANSMISIÓN DE INFORMACIÓN⁴⁸

Tal vez son las redes digitales las que más han llamado la atención en las transformaciones de la organización social y productiva que han sido provocadas por el paradigma digital. Para Castells (2001), por ejemplo, *La Red* significa nuevas formas de organización que reemplazan a las jerarquías verticales como esquemas predominantes de organización social. Las fuerzas de la *convergencia digital* son más visibles entre las diferentes redes de transmisión (OCDE, 2006b). Internet, uno de los productos más importantes de esta revolución, se convierte paulatinamente en una infraestructura crítica, a pesar de que no fue pensada para ello. Esta función se profundizará en el futuro, lo que ha llevado a considerar el rediseño de su arquitectura básica para contar con un sistema de redes digitales que expanda las oportunidades de innovación tecnológica y de la demanda progresiva.

En el presente capítulo se ofrece una panorámica general de las redes digitales. Tras una breve introducción sobre los conceptos básicos de sistemas de comunicación, se muestra cómo han evolucionado hacia la llamada convergencia. Posteriormente se presentan los avances y tendencias en infraestructura de redes, tanto en la red de acceso como en el núcleo de los operadores. Dada su posición innegable como la red de redes de la sociedad contemporánea, se dedicará una sección especial a internet, en la que se analizarán varios aspectos y se presentarán brevemente los proyectos de rediseño más relevantes en la actualidad. Finalmente, se discutirán algunos puntos relevantes sobre las tendencias en servicios y contenidos digitales en red, y sobre las implicaciones de la convergencia digital.

⁴⁸ Este capítulo ha sido elaborado por José Incera del Departamento Académico de Sistemas Digitales, y Rodolfo Cartas y Osvlado Cairó del Departamento Académico de Computación del Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM). La sección sobre el espectro radioeléctrico ha sido el aporte de Javier Juárez y Ómar de León.

a. Las redes digitales

Una red digital es un sistema de comunicaciones en el que la información que se transporta está codificada en el formato de código binario. Con el fin de tener un entendimiento común de cómo funcionan las redes digitales, sus características, problemáticas y oportunidades, es conveniente describir brevemente qué es un sistema digital.

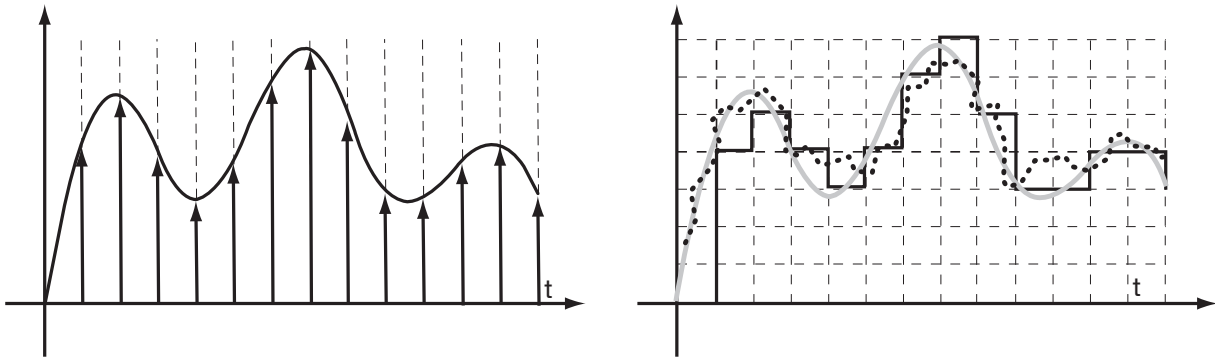
1. La comunicación digital

El surgimiento del paradigma digital condujo a la migración de los sistemas analógicos de comunicación (código continuo) hacia los sistemas digitales (código binario). En un sistema analógico se utiliza una cantidad física, como el voltaje, para representar el comportamiento de otro sistema físico. Las propiedades de esta representación son explotadas para registrar, transformar, duplicar o amplificar el fenómeno original. Las señales utilizadas en un sistema analógico son continuas en el tiempo y en su amplitud (es decir, en su magnitud), por lo que pueden tomar un número potencialmente infinito de valores. Un sistema analógico puede ejemplificarse mediante el funcionamiento de un sismógrafo, el cual está formado por un marco sujeto al terreno, una masa suspendida unida al marco, un mecanismo de amortiguación para prevenir oscilaciones de larga duración causadas por un terremoto, y un mecanismo de registro de las ondas sísmicas. Durante un movimiento telúrico, las ondas sísmicas mueven la base del sismógrafo mientras que la masa suspendida tiende a estar en una posición fija debido a su inercia. Un sismógrafo analógico registra directamente el movimiento entre su base y la masa suspendida, y durante todas estas operaciones, las propiedades ondulatorias del fenómeno físico original permanecen inalteradas. Un sistema analógico es relativamente simple y puede ser representado por modelos matemáticos sencillos, aunque una desventaja es la acumulación de pequeñas variaciones aleatorias cada vez que se realiza una operación sobre la señal adquirida. Por ejemplo, en el caso específico de un sistema eléctrico, siempre existen perturbaciones causadas por el movimiento molecular (ruido térmico).

Por otro lado, en un sistema digital se utiliza una representación numérica finita (o discreta) del fenómeno físico, y a la transformación de la señal analógica en un conjunto de valores discretos se le llama digitalización. La representación digital de una señal analógica se construye obteniendo *muestras* de su magnitud a intervalos regulares como se observa en la imagen izquierda del gráfico 12.1. A cada muestra obtenida se le asigna el más cercano de un conjunto finito de valores en un proceso llamado *cuantización*, representado en la imagen derecha del gráfico. Finalmente, el valor seleccionado se codifica, utilizando típicamente una representación binaria.

La cuantización implica una distorsión de la señal original porque, en general, el valor discreto que representa la muestra no coincidirá exactamente con su magnitud en ese punto. Por otro lado, la señal digital es mucho más inmune a factores externos (como el ruido térmico, representado por la línea punteada en el gráfico) que puedan afectar la magnitud de la señal. El conjunto de valores utilizados para la representación digital, debe elegirse con cuidado, ya que cuanto mayor sea el conjunto, menor

Gráfico 12.1
MUESTREO Y CUANTIZACIÓN



será la separación entre ellos y, por consiguiente, el error de cuantización. Sin embargo, el patrón binario para representar estos valores también aumenta.⁴⁹ Además, la inmunidad al ruido disminuirá, porque aumenta la probabilidad de tomar un valor por otro.

Para reconstruir la señal analógica se recurre a un proceso matemático de interpolación. En 1924, Henry Nyquist mostró, a través del teorema que lleva su nombre, que para obtener una reconstrucción completa, bastaba con tomar muestras al doble de la frecuencia máxima de la señal original. Es necesario, entonces, conocer el rango de frecuencias (llamado ancho de banda) de las señales para poder digitalizarlas; es ilustrativo ejemplificar estos conceptos en el marco de las redes telefónicas digitales. La voz humana está formada por señales que tienen componentes de frecuencia más allá de los 12.000 Hz. Sin embargo, los componentes principales de la voz, es decir, aquellos que permiten distinguir con claridad el mensaje emitido, se encuentran en el rango de 300 Hz a 3.400 Hz. En las redes telefónicas digitales se transforma la voz en una señal eléctrica que es sensada cada 0,000125 segundos, obteniendo 8.000 muestras por segundo (poco más del doble requerido por el teorema de Nyquist). Cada valor se representa con un número binario de 8 *bits*, por lo que la señal digital tiene una tasa de 64 kb/s.⁵⁰

Si bien con el proceso de digitalización se introduce una cierta complejidad en el tratamiento de la señal original (porque es necesario tomar las muestras, cuantizarlas y codificarlas), la representación digital de la información tiene enormes ventajas para poder tratarla (por ejemplo, para comprimirla, transformarla, analizarla median-

⁴⁹ Se necesitan $b = \log_2 V$ bits para representar V valores.

⁵⁰ En los modernos sistemas de comunicaciones de voz se utilizan distintas técnicas de compresión para reducir sustancialmente esta tasa.

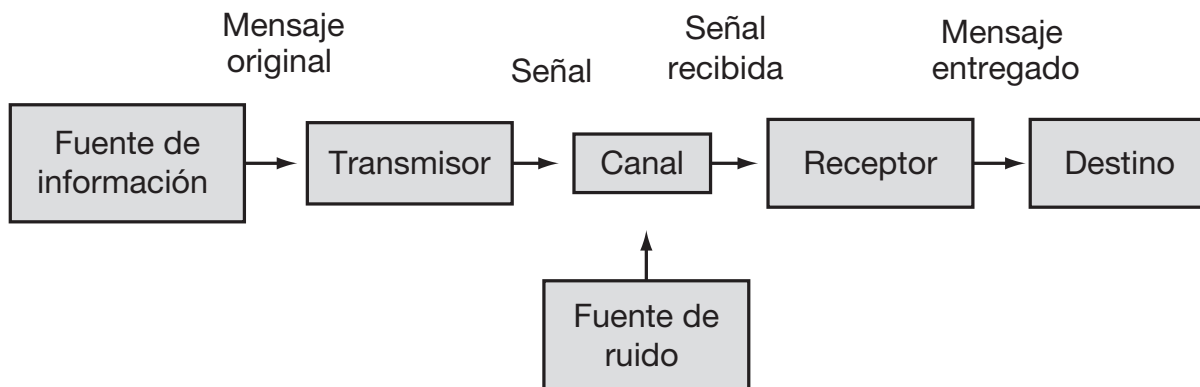
te programas de cómputo), almacenarla (por ejemplo, en un archivo) y transportarla en sistemas de comunicaciones digitales. Es por ello que en la actualidad, prácticamente todos los sistemas de comunicaciones están convergiendo hacia la digitalización.

Shannon (1948) propuso pensar en el problema de las comunicaciones en términos de los bloques que se ilustran en el gráfico 12.2. Una fuente de información genera mensajes para un cierto destinatario o múltiples destinatarios. El transmisor convierte estos mensajes en una señal que viaja por un canal de comunicación hasta el receptor, el cual se encarga de reconstruir el mensaje y entregarlo al destinatario. En su paso por el canal, la señal es objeto de perturbaciones impredecibles producidas por la naturaleza del canal o por elementos externos al sistema, así que la señal recibida siempre será diferente de la emitida. Si el sistema de comunicaciones es digital, el mensaje, su representación en una señal, o ambos, utilizan una secuencia de valores digitales.

El teorema de Nyquist, además de mostrar cómo reconstruir una señal original a partir de la señal digital, fija el límite máximo de la cantidad de información que puede ser transmitida a través de un canal sin ruido.⁵¹ Claude Shannon extiende en 1948 el trabajo original de Nyquist para canales con presencia de ruido (Tanenbaum, 1996). Si la cantidad de ruido en el canal se calcula a partir de la relación entre la potencia de la señal a transmitir (S) y la potencia del ruido presente (N), entonces la tasa ideal de un canal con ancho de banda H y coeficiente señal a ruido S/N es: Tasa máxima de datos = $H \log_2 (1 + S/N)$ b/s. Este resultado es muy importante porque, además de ofrecer el límite teórico de la capacidad de comunicación de un canal, indica que cualquier mensaje puede ser transmitido con confiabilidad, a pesar de tener

Gráfico 12.2

SISTEMA DE COMUNICACIÓN SEGÚN SHANNON, 1948



⁵¹ Si la digitalización se realiza al doble de la frecuencia máxima de la señal original (H) y si se utilizan V niveles discretos, entonces: Tasa máxima de datos = $2H \log_2 (V)$ b/s.

un canal con ruido, y se puede diseñar una codificación que mejore el coeficiente señal a ruido (Rheingold, 2000).

Estas fueron las bases para diseñar las primeras redes digitales. A partir de una teoría común, la proliferación de diferentes arquitecturas de cómputo dificultaba la construcción de una tecnología de red para comunicar máquinas diferentes. Para resolver estas dificultades se recurrió a la estrategia de “divide y vencerás” organi-

Cuadro 12.1

SISTEMA DE COMUNICACIÓN SEGÚN SHANNON, 1948

OSI	Explicación	TCP / IP
Aplicación	A través de esta capa los usuarios acceden a los servicios de la red. En ella se definen, por ejemplo, los protocolos SMTP, FTP y HTTP utilizados, respectivamente, para intercambiar mensajes de correo electrónico, transferir archivos y navegar a través de las páginas <i>web</i> .	Aplicaciones (correo electrónico, portales, <i>chat</i> , y otros)
Presentación	Transforma datos para proveer una representación estándar e interoperable entre los equipos terminales.	
Sesión	Se encarga de controlar el establecimiento y el fin de un diálogo entre dispositivos. No existen protocolos en la pila TCP/IP definidos específicamente para realizar las funciones de esta capa, ni de la de presentación.	
Transporte	Provee la transferencia transparente de datos de extremo a extremo de la red. Esta capa puede encargarse de garantizar que la información llegue a su destino correctamente, como lo hace el protocolo TCP (<i>transmission control protocol</i>) en internet.	TCP / UDP
Red	Establece los mecanismos necesarios para encaminar eficientemente la información entre los equipos terminales. En internet, estas funciones las realiza el protocolo IP (internet protocol).	IP (protocolo de internet)
Enlace de datos	Se encarga de dar formato y de proveer una transmisión libre de errores entre dos elementos conectados directamente. En esta capa entra una parte importante de las funciones realizadas por los protocolos de red de área local como Ethernet.	Interfaz de redes (capas inferiores)
Física	Define las características de los elementos necesarios para la conexión así como las de los <i>bits</i> enviados (características eléctricas, ópticas, y otros).	

zando el problema de comunicación en una estructura jerárquica de capas. Cada capa es responsable de resolver una tarea específica de comunicación, ofreciendo sus servicios a la capa inmediata superior. Para resolver su tarea, las capas en un determinado nivel se comunican con capas del mismo nivel en otros dispositivos, a través de los protocolos de comunicaciones. El modelo de capas más conocido es el marco de referencia OSI (*open systems interconnection*) de la Organización Internacional de Normalización (ISO). Se trata de un modelo de siete capas explicado en el cuadro. Dada su importancia, también se incluye como referencia el modelo de capas utilizado por internet y conocido como modelo.

2. La cobertura geográfica de diferentes redes digitales

Existen diversas maneras en las que las redes digitales pueden ser clasificadas; por ejemplo, por los servicios que ofrecen (telefonía fija y móvil, televisión, intercambio de datos); por su función en la arquitectura de red (redes de acceso, redes de transporte); por la población de usuarios que las utilizan (redes públicas, privadas, corporativas, para el hogar), o por su cobertura geográfica. Esta última clasificación es muy común en la literatura, por lo que se presentará brevemente.

Redes de área corporal (BAN, body area network). Se trata de un concepto reciente en el que los dispositivos utilizan el cuerpo humano como medio de transmisión. Los dispositivos transmiten información entre sí con el simple hecho de tocarlos. Esta tecnología debe utilizar señales de baja potencia para reducir la interferencia entre dispositivos y, sobre todo para evitar efectos nocivos para la salud. Una ventaja del cuerpo como medio de transmisión es que la información no se irradia al ambiente. En el Instituto de Investigaciones en Electrónica y Telecomunicación de República de Corea se ha desarrollado un prototipo que permite intercambiar datos a 5 kb/s (IJET, 2005). Esta clase de dispositivos podría usarse para ofrecer servicios de autenticación, pago electrónico o monitoreo clínico de pacientes. Su área de cobertura es de un par de metros.

Redes de área personal (PAN, personal area network). Son redes típicamente inalámbricas que interconectan dispositivos de cómputo en un área de cobertura pequeña, alrededor de 10 metros. Las primeras redes PAN utilizaban enlaces infrarrojos para la interconexión y ofrecían velocidades de 2.4 kb/s hasta 16 Mb/s en un rango de hasta un metro, pero los dispositivos debían contar con una trayectoria directa entre ellos, es decir, sin objetos que la obstruyeran. A esto se le conoce en telecomunicaciones como *línea de vista (LOS, line of sight)*. Los estándares actuales, entre los que destacan IEEE 802.15.1, mejor conocido como *Bluetooth*, IEEE 802.15.4, llamado *ZigBee*⁵² y *Wireless USB*,⁵³ no requieren de LOS. *Bluetooth 2.0* ofrece velocidades de

⁵² IEEE 802.15 WPAN Task Group 1. <http://www.ieee802.org/15/pub/TG1.html>

⁵³ Certified Wireless USB. <http://www.usb.org/developers/wusb/>

3 Mb/s, mientras que WUSB alcanza los 110 Mb/s en distancias de 10 metros. ZigBee, más enfocada a la interconexión de dispositivos, es una red muy simple, de bajo costo, baja velocidad (hasta 250 kb/s) y relativamente segura. Todas ellas están diseñadas para operar en modo *ad-hoc*, en el que los dispositivos electrónicos se conectan entre sí sin la intervención del usuario, es decir, los dispositivos identifican a la red, solicitan su ingreso, reciben una dirección y establecen la comunicación por sí mismos.

Redes de área local (LAN, local area network). Son las más conocidas en las organizaciones y, de manera creciente, en los hogares. Permiten conectar dispositivos con una cobertura de entre cientos de metros hasta un par de kilómetros. Históricamente, la tecnología predominante en estas redes ha sido Ethernet, creada por Robert Metcalfe en los laboratorios Xerox PARC a mediados de los años setenta (Metcalfe y Boggs, 1976).⁵⁴ Hoy día, las redes Ethernet (establecidas por medio de fibra óptica) pasan de 3 Mb/s a 10 Gb/s y se espera que en dos años se ofrezca comercialmente una versión con velocidades de 100 Gb/s (Kerner, 2006). Debido a su gran flexibilidad, facilidad de integración y bajos costos de implementación, en la última década se ha visto un crecimiento explosivo de redes locales inalámbricas basadas en la familia de estándares IEEE 802.11⁵⁵ tanto en las organizaciones privadas como en el hogar y en áreas públicas como aeropuertos, parques y cafeterías, sobre todo para dar acceso a internet en los llamados *hot-spots*. Algunos analistas consideran que en los próximos 5 o 10 años, las redes locales inalámbricas serán la principal tecnología de acceso (Hochmuth, 2007). Estas redes, también conocidas como *WiFi*,⁵⁶ ofrecen velocidades nominales que alcanzan los 54 Mb/s, mientras versiones más recientes (IEEE 802.11n) logran ofrecer velocidades reales de hasta 200 Mb/s. Estas redes locales inalámbricas han estado acompañadas de un halo de inseguridad porque utilizan un medio compartido (el aire) para comunicarse, lo que facilita la interceptación de mensajes por receptores no deseados, y porque los primeros mecanismos de seguridad diseñados para protegerlas, terminaron siendo muy vulnerables. Sin embargo, los nuevos protocolos de seguridad (IEEE 802.11i) permiten que estas redes sean tanto o más seguras que sus contrapartes conectadas por cables, aunque la activación correcta de los mecanismos de seguridad es relativamente complicada; por eso se ha lanzado recientemente la iniciativa WPS (*WiFi protected setup*) como una norma para crear redes altamente seguras con mucha mayor facilidad (Cox, 2007).

Redes de campus (CAN, campus area network). A medida que fueron diseminándose las redes locales surgió la necesidad de conectarlas entre sí de manera eficaz en áreas que podían abarcar unos cuantos kilómetros, como hospitales, aeropuertos, recintos universitarios y edificios de empresas. Esta interconexión podía realizarse por medio de conmutadores ATM, o por medio de tecnologías específicas para ello,

⁵⁴ <http://www.ieee802.org/3/>.

⁵⁵ <http://www.ieee802.org/11/>.

⁵⁶ *WiFi* es una abreviatura de *wireless fidelity*, una certificación proporcionada por una alianza de fabricantes para garantizar que los equipos cumplan con las normas y sean interoperables entre sí.

como FDDI (*fiber distributed data interface*). En la actualidad, la interconexión suele darse a través de enlaces punto a punto (típicamente enlaces ópticos) entre conmutadores Ethernet o enrutadores IP, por lo que para varios investigadores esta categoría ya no es relevante.

Redes de área metropolitana (MAN, metropolitan area network). Con una cobertura de decenas de kilómetros, en esta categoría suelen concentrarse dos grupos de tecnologías: aquellas utilizadas principalmente para interconectar redes locales dentro de una ciudad y aquellas utilizadas como redes de acceso, principalmente a internet. Para la interconexión de redes locales, la tecnología predominante es MetroEthernet (IEEE 802.3 ah), la cual evolucionó de las redes LAN, con las que los usuarios tienen una larga familiaridad. MetroEthernet puede ser implementada sobre líneas de cobre aunque con mayor frecuencia su infraestructura se construye con fibra óptica. El proveedor puede ofrecer velocidades de hasta 100 Gb/s (EFMF, 2004).

Redes de área amplia (WAN, wide area network). En esta categoría, en la que también se incluyen las redes de área regional (RAN, *regional area network*), se cubren grandes extensiones, incluso varios países. La mayoría de estas redes está integrada a la infraestructura de transporte (alambrada) de los grandes operadores. Típicamente están formadas por nodos de conmutación de gran velocidad interconectados entre sí con enlaces de fibra óptica en los que se utilizan tecnologías como ATM, SONET/SDH y WDM. La recientemente aprobada norma IEEE 802.22 (Cordeiro y otros, 2005), tiene como objeto proveer acceso inalámbrico fijo a regiones de hasta 100 km de radio en áreas con baja densidad poblacional. Se utilizan frecuencias sin licencia en la banda originalmente establecida para la teledifusión. El estándar hace uso de radios cognitivos, un aspecto que se abordará más adelante, y posee la gran ventaja de no interferir con dispositivos que ocupan frecuencias con licencia. Esta tecnología resulta de particular interés en países en desarrollo y en áreas rurales.

Redes de área global. Las redes de área global cubren un área geográfica ilimitada e interconectan una gran cantidad de redes. Este es el caso de las redes telefónicas fijas a escala mundial, que están integradas casi totalmente con sus contrapartes celulares. Otro ejemplo evidente es internet, la gran “red de redes”, que ha rebasado las fronteras de la Tierra con la propuesta de iniciativas para lanzar sondas espaciales que funcionan por medio de enrutadores con el protocolo IP para enviar información a nuestro planeta (Buster, 2005).

b. Infraestructura de redes

En esta sección se presentan brevemente los principales avances observados en las tecnologías más utilizadas tanto al interior de las redes (llamadas redes de transporte), como para acceder a ellas (llamadas redes de acceso). Para esto hay que recordar que históricamente en las redes de telefonía fija se conectaron los dispositivos de los usuarios mediante pares de alambre de cobre trenzado y con una central operadora. A esta red se le conoce como red de abonado, de acceso o de última milla. Las redes telefónicas fueron desarrolladas específicamente para ofrecer los servicios de comunicación de voz, y las centrales telefónicas disponían de filtros que cortaban las

señales de voz en la red de abonado a frecuencias entre 300 y 3.400 Hz (véase la sección anterior). Dada su ubicuidad, estas redes resultaban muy atractivas para enlazar computadoras digitales entre sí por medio de módems (moduladores-demoduladores) cuya función es transformar las señales digitales de las computadoras en tonos audibles que viajen por la red sin ser eliminados por los filtros.

El esquema anterior presenta al menos dos problemas: en primer lugar, los anchos de banda de 3.100 Hz disponibles, limitan severamente la velocidad de transmisión, alcanzando apenas los 56 kb/s con sofisticadas técnicas de procesamiento de señales. En la actualidad se requiere de tasas mucho mayores (a lo que suele llamarse *banda ancha*) para poder acceder conjuntamente a servicios de voz, datos y video. Por otra parte, la red telefónica opera sobre la base de la reserva de recursos cuando se establece un circuito (durante la fase de marcado) entre el emisor y el receptor. Los recursos reservados no pueden ser compartidos por otros usuarios, lo que garantiza la calidad de la comunicación pero la hace muy costosa (sobre todo en enlaces de larga distancia) e ineficiente; el tráfico entre computadoras es muy irregular, con grandes intervalos de silencio que podrían ser aprovechados por otras conexiones.

Esto dio origen a las redes de conmutación de paquetes (como X.25, *frame relay* y, por supuesto, internet) concebidas para la comunicación eficiente entre computadoras. En estas redes, la información intercambiada es enviada en bloques llamados datagramas⁵⁷ a través de enlaces compartidos por datagramas de otras conversaciones, con ayuda de nodos de conmutación que los van encaminando hacia su destino final. Sin embargo, todavía era necesario enlazar las instalaciones del usuario con el punto de presencia (PoP) más cercano del operador de la red. Para conformar esta *red de acceso* a los servicios del operador, se utilizaban frecuentemente enlaces privados con costos muy elevados.⁵⁸ Durante los años noventa, los usuarios empezaban a exigir con mayor intensidad servicios de acceso a redes de datos más versátiles y económicos, particularmente para acceder a internet.

I. Tecnologías de acceso

Redes de telefonía, xDSL

En la demanda por utilizar servicios de voz y datos, los operadores telefónicos encontraron una oportunidad para explotar más eficientemente su red de abonado, e incrementar así sus ingresos por usuario, mediante la aplicación de una serie de tecnologías conocidas genéricamente como línea digital de suscriptor (DSL, *digital subscriber line*). Sus dos exponentes más populares son ADSL (*asymmetric DSL*) y VDSL (*very high bit-rate DSL*). En las instalaciones del usuario se coloca un módem que procesa y agrupa las señales digitales con el canal telefónico, y las envía por el par de cobre de la red

⁵⁷ Dependiendo de la tecnología utilizada, también se les llama paquetes, tramas o celdas.

⁵⁸ De hecho, los enlaces privados como redes de acceso siguen siendo muy populares y, gracias a la aparición de nuevas opciones tecnológicas, su costo ha disminuido sustancialmente en muchos países.

de abonado hacia la central telefónica. En esta central, un equipo llamado DSLAM (*digital subscriber line access multiplexer*) separa las señales de voz y datos y las envía, respectivamente, a la red telefónica y a internet.

Las capacidades ofrecidas por las tecnologías xDSL dependen de varios factores, en particular de la calidad del cableado desplegado, la distancia entre las instalaciones del usuario y el DSLAM, así como del número de pares de cobre (de accesos) en un mismo cable. Para obtener el mejor rendimiento de estas tecnologías, los operadores se ven obligados a reducir la distancia entre el módem y los DSLAM, lo que representa fuertes inversiones en infraestructura para colocar los DSLAM en los gabinetes de distribución y garantizar condiciones apropiadas de suministro de energía, ambientales y de seguridad (Pozas Álvarez y Sánchez, 2006).

ADSL está concebido específicamente para servicios de navegación por internet y acceso a servidores de aplicaciones (correo, archivos, y otros). En estas aplicaciones, la cantidad de información que viaja en cada sentido es típicamente asimétrica: se envía mucho menos información hacia la red (en forma de consultas) de la que se recibe (los contenidos solicitados), por lo que la capacidad del enlace se distribuye en un pequeño canal *ascendente* (hacia la red) y uno mucho mayor *descendente* (hacia el usuario). Con la norma ITU G.992.1 se pueden alcanzar tasas de 1 y 8 Mb/s en sendos canales, aunque los modelos de negocio de una gran cantidad de operadores ofrecen paquetes con distintas capacidades de subida y bajada. Frente a una demanda progresiva de mayores capacidades para acceder a servicios más exigentes como juegos en línea, descargas de música y servicios de video, hoy muchos operadores ofrecen ADSL2+ con canales de 24 y 1 Mb/s de bajada y subida respectivamente, y VDSL2 que alcanza tasas agregadas (ambos canales) de hasta 200 Mb/s en su última versión (ITU G.993.2), aunque esta tecnología es especialmente vulnerable a la separación entre módem y DSLAM: la capacidad se reduce a 100 Mb/s a medio kilómetro y menos de 50 Mb/s a un kilómetro.

Redes de televisión

Una gran cantidad de redes de televisión por cable ya está desplegada y su cable coaxial tiene características eléctricas muy superiores a las del par de cobre de la red de abonado en telefonía. Por eso, una red de televisión por cable necesita de pequeñas modificaciones para dotarla de la capacidad de transmisión de datos a alta velocidad. Hay varias maneras de lograr esto, y la más común se basa en la norma Docsis 3.0 (*data over cable service interface specification*), la cual permite tasas de transmisión mayores a los 160 Mb/s; de todas maneras, los operadores suelen limitar la capacidad ofrecida en función de sus estrategias de negocio. Por otra parte, la capacidad nominal es compartida por los usuarios de una zona de cobertura determinada, lo que significa una desventaja ante las tecnologías xDSL que entregan anchos de banda por usuario.

Existe un gran potencial para integrarse a las redes digitales al aprovechar las redes tradicionales y el hábito cultural de la televisión terrestre. Si la infraestructura de la televisión terrestre pudiese ser utilizada para proveer servicios interactivos digi-

tales, la brecha digital en el acceso a las TIC podría ser reducida sustancialmente, y sería posible ofrecer servicios como e-aprendizaje, e-salud, e-gobierno a una gran parte de la población (Hilbert y Katz, 2003). Los primeros sistemas de televisión digital aparecen para explotar sus bondades técnicas (menor ancho de banda por canal, mayor calidad de imagen y sonido, facilidades para el tratamiento de la imagen, entre otros) en las redes de distribución convencionales (difusión terrestre, satelital y cable), hasta llegar a la televisión de alta definición (HDTV). Existen tres estándares para la transmisión de video digital: DVB (*digital video broadcasting*), ATSC (*advanced television systems committee*) e ISDB (*integrated services digital broadcasting*). ATSC, establecido en Estados Unidos, también es utilizado en Canadá, México y algunos países asiáticos. En su diseño fue muy importante el interés de difundir HDTV de manera efectiva. DVB es la norma europea, que también se utiliza en Australia y la mayoría de los países asiáticos y africanos. En este estándar se privilegian los servicios interactivos y la difusión restringida (*multicasting*). En realidad, se trata de una familia de protocolos para distintas redes de difusión (satelital, DVB-S, terrestre, DVB-T, por cable, DVB-C, móvil, DVB-H) y servicios asociados. ISDB es una norma constituida sobre la base del sistema DVB, pero modificada para atender características particulares del mercado japonés, especialmente para dar soporte a dispositivos móviles.

En América Latina, el gobierno de México consideró sus estrechos vínculos comerciales con Estados Unidos y ha optado por retener la norma ATSC, para beneficiarse de las economías de escala estadounidenses. Las autoridades de Brasil realizaron una serie de pruebas intensivas entre las tres normas para elegir su estándar nacional, y encontraron que ATSC tenía un desempeño deficiente para dispositivos móviles en zonas urbanas debido al efecto de trayectorias múltiples. En general, DVB tenía un mejor desempeño que ISDB, aunque esta última ofrece más flexibilidad para combinar distintos servicios a móviles. Finalmente se eligió la norma japonesa. Más allá de los criterios técnicos, el gobierno brasileño tomó en cuenta otros factores como el impacto en la industria local y los planes de despliegue de la infraestructura necesaria. Al optar por ISDB, Brasil establece una estrecha alianza tecnológica con las empresas japonesas y recibe un enorme apoyo de Japón para desarrollar su infraestructura.

Redes eléctricas

Desde mediados de la década de 1930 se propuso la idea de utilizar las redes de distribución de energía eléctrica para transportar información, pero hasta muy recientemente no se le había prestado mucha atención (Palet, 2003). La idea básica consiste en montar sobre la señal de corriente eléctrica la información que se desea transferir. Existen varias tecnologías para esto y se conocen genéricamente como PLC (*power line communications*).⁵⁹ En la red de baja potencia se puede ofrecer una capacidad de

⁵⁹ Existen otras tecnologías como HomePlug y Cepca con las que se utiliza la red eléctrica para interconectar dispositivos en el hogar. No se incluyen aquí porque no son redes de acceso.

45 Mb/s pero, como en Docsis, esta capacidad es compartida entre los usuarios. Su principal ventaja es que la red eléctrica tiene una penetración aún mayor que las redes telefónicas y de televisión por cable (por ejemplo, en China hay 9 teléfonos fijos pero 32,1 aparatos de televisión por cada 100 habitantes) (Palet, 2003), por lo que su despliegue como red de acceso puede hacerse sumamente rápido y a bajo costo, ofreciendo una alternativa a Docsis y xDSL. A primera vista, esta tecnología puede ser muy atractiva para aumentar la teledensidad en países emergentes o en zonas rurales que tienen una cobertura muy escasa de cable o de telefonía. Sin embargo, el transporte de datos en redes eléctricas presenta varios desafíos técnicos porque en muchos países las líneas eléctricas son altamente ruidosas y con variaciones muy considerables. Además, no se ha definido un estándar para estas tecnologías; los primeros despliegues dependen en gran medida de normas cerradas. La IEEE ha creado el grupo de trabajo P1901 con el fin de desarrollar un estándar abierto e interoperable que pueda alcanzar los 130 Mb/s.

Redes de fibra óptica

Con la aparición de nuevos servicios ofrecidos a través de las redes digitales, como consulta de documentos multimedia, IPTV, juegos en línea, o descarga de archivos de audio y video, la demanda por mayores anchos de banda en la red de acceso crece enormemente. Hasta el momento, las autoridades de República de Corea y Japón han mostrado un gran interés por desplegar fibra óptica en la red de acceso. Varios autores estiman que en el corto plazo se necesitarán entre 50 y 100 Mb/s en el canal descendente y 30 Mb/s en el canal ascendente por usuario⁶⁰ (Lepley, 2005; Pozas y Sánchez, 2006). Estas tasas llevan al límite la capacidad de las tecnologías de acceso fijas construidas sobre la base de cobre e inalámbricas, lo que ha incentivado el despliegue de fibra óptica en la red de acceso. Para el transporte de información, la fibra óptica es sumamente atractiva por su total inmunidad a interferencias electromagnéticas, su poca atenuación y, sobre todo, su enorme capacidad. Con las modernas técnicas de fabricación, se estima que una sola fibra puede alcanzar un ancho de banda de 2.5 Tb/s (Hurtado, Lobo y Pérez, 2006). Sin embargo, los despliegues de fibra óptica tienen un costo elevado, sobre todo para la fibra de muy alta velocidad, por lo que los operadores deben elegir cuidadosamente la arquitectura de red y el momento oportuno para implementarla.

Típicamente, la red óptica está formada por un dispositivo llamado terminal de línea óptica (OLT, *optical line terminal*) en las instalaciones del operador, un conjunto de terminales ópticos en las instalaciones del usuario (ONT, *optical network terminal*) o cerca de él (ONU, *optical network unit*) y elementos que agregan y desagregan las fibras individuales en la red de acceso. Estos elementos pueden ser activos (es decir, dispositivos electrónicos que requieren de energía eléctrica para operar) como

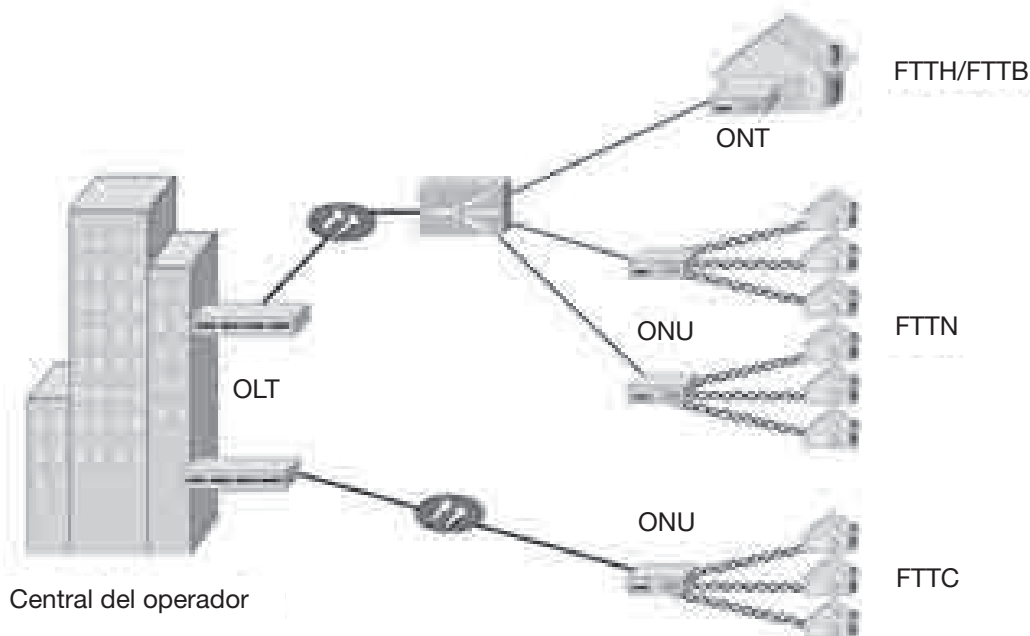
⁶⁰ Este cálculo supone el acceso simultáneo a tres canales de televisión de alta definición, sesiones de juegos en línea, telefonía IP, navegación intensiva y descarga de un archivo de video.

multiplexores y conmutadores, o pasivos, llamados separadores ópticos (*splitters*). Las redes con elementos pasivos (PON, *passive optical network*) son más atractivas económicamente y, por consiguiente, son las más comunes. Salvo en algunos casos, resulta inviable económicamente sustituir por completo la red de abonado con enlaces de fibra óptica, por lo que los operadores tienden a realizar los despliegues de fibra hasta un punto “x” de la red de acceso (FTTx, *fiber to the point x*), como se muestra en el gráfico 12.3.

En las redes FTTH/FTTB, la fibra llega hasta el hogar (“*H*ome”) o hasta el edificio (“*B*uilding”) del usuario. Esta arquitectura se puede utilizar para despliegues en nuevas construcciones urbanas o para usuarios que requieren de accesos con un gran ancho de banda, como grandes empresas, escuelas y, en general, centros con gran concentración de usuarios. Los despliegues FTTB son más viables porque el costo de la red se prorratea entre todos los departamentos. En las redes FTTC (*fiber to the curb*) y FTTN (*fiber to the node*) se aprovecha parte de la red de abonado telefónica, lo que abarata y simplifica el despliegue de la red de acceso. Los ONU se localizan en los gabinetes de cableado o en los postes de distribución y se encargan de realizar la conversión eléctrica-óptica de las señales, así como de la transformación entre los formatos de entramado utilizados en cada sección. Como puede observarse, en las redes PON el ancho de banda de la fibra se comparte entre varios usuarios, por lo que es común limitar a 32 el número de accesos en los separadores ópticos. Existen varios estándares para las redes PON. El primero en aparecer fue APON (ITU G.983), que

Gráfico 12.3

ARQUITECTURA DE REDES ÓPTICAS DE ACCESO



ofrece una capacidad de 622 Mb/s descendente y 19 Mb/s en el canal ascendente. BPON ofrece los mismos servicios y agrega un canal para distribución de video. GPON (ITU G.984) utiliza un entramado especial (*generic framing procedure*) para ofrecer velocidades hasta de 2.5 Gb/s y 78 Mb/s en los canales descendente y ascendente. EPON (IEEE 802.3ah), es la norma que se utiliza en redes metropolitanas, y que ofrece velocidades de 1G y 30 Mb/s. Una tecnología prometedora, WPON está en fase de estandarización. Basada en WDM (sección 4.3), la idea es que el separador óptico entregue una longitud de onda a cada usuario, lo cual permite incrementar sustancialmente la capacidad disponible para cada uno de ellos.

Redes inalámbricas móviles y fijas

Las redes de telefonía celular fueron desarrolladas en la segunda mitad del siglo XX para ofrecer servicios móviles de voz. En general, están conformadas por múltiples puntos fijos (radio-bases) interconectados entre sí, y estos puntos fijos ofrecen servicios a dispositivos inalámbricos dentro de un área geográfica determinada, llamada célula. La comunicación entre los dispositivos y las estaciones base utiliza señales de radio en frecuencias reservadas específicamente para esto. Al igual que el sistema telefónico tradicional, este tipo de redes ha evolucionado para ofrecer servicios móviles de transferencia de datos. La segunda generación de tecnología celular (2 G, como GSM, CDMA, TDMA) se caracteriza por el uso de señales digitales enfocadas al transporte de voz, pero ya ofrecen una limitada capacidad de transmisión de datos con protocolos como GPRS con tasas de 384 kb/s. La siguiente generación, 3 G, está diseñada para ofrecer servicios simultáneos de voz y datos de banda ancha. Entre los estándares utilizados para este tipo de redes se encuentran CDMA-2000, EV-DO y UMTS. UMTS tiene una capacidad de 2 Mb/s para transmisión de datos. HSDPA, una actualización de UMTS, puede teóricamente alcanzar velocidades de 14.4 Mb/s, aunque típicamente se ofrecen servicios con velocidades de hasta 3.6 Mb/s.

Las tecnologías inalámbricas fijas son aquellas que permiten desplazamientos limitados y están convergiendo progresivamente con las redes inalámbricas móviles. WiMax cae en esta categoría y ha sido muy apoyado por importantes fabricantes de semiconductores, porque podría existir la posibilidad de utilizar esta tecnología como un sustituto más eficiente y económico a las redes celulares de 3 G. Las tecnologías WiMax (IEEE 802.16) y la recién estandarizada iBurst (IEEE 802.20) proveen servicios de banda ancha inalámbrica. En estas redes también se utiliza el concepto de célula, pero se abarca un área mucho mayor que en las de telefonía. Con línea de vista, el radio de la célula puede llegar a 50 km. Sin línea de vista, es decir, permitiendo obstáculos como árboles y edificios entre la estación base y el usuario, el radio se reduce a 15 km (Bray y Mahony, 2006). En áreas sin una infraestructura telefónica o de televisión por cable, estas tecnologías pueden representar una opción sumamente atractiva para la oferta de servicios de banda ancha, porque los costos de despliegue son sustancialmente menores que los incurridos al implementar redes alambreadas.

iBurst tiene como objetivo brindar movilidad a los usuarios con velocidades de desplazamiento de hasta 250 km/h. La norma IEEE 802.16e de WiMax también per-

mite movilidad hasta 100 km/h. Las tasas de transferencia dependen de muchos factores como la distancia entre el usuario y la estación base, el nivel de interferencia, la movilidad del usuario y el número de éstos, ya que la capacidad de la base es compartida por ellos. Aunque se habla de 70 Mb/s compartidos, en ambientes sin línea de vista es más común que se alcancen tasas de alrededor de 10 Mb/s. Sin embargo, en esta situación también los modelos de negocio de los operadores pueden limitar los anchos de banda por usuario. Si bien estas tasas pueden no ser suficientes para los nuevos servicios multimedia, WiMax e iBurst resultan muy atractivas como alternativas flexibles de acceso a servicios más convencionales, y algunos operadores de redes ya han seleccionado a WiMax como la base para el desarrollo de sus redes celulares de cuarta generación (4G).

Redes satelitales y plataformas de gran altitud

Los satélites artificiales de comunicaciones funcionan como una estación de relevo de microondas. El satélite capta una señal enviada desde la Tierra, la amplifica y la envía de regreso. El área de cobertura de los satélites (su huella) es sumamente amplia, por lo que son ideales para servicios de difusión. También son regularmente utilizados para establecer comunicaciones punto a punto y, en muchas regiones, son la única tecnología de comunicaciones disponible; por ejemplo, para establecer enlaces telefónicos en medio del océano, en la selva, en picos montañosos y en otras regiones no habitadas.

Los satélites en el llamado *cinturón de Clarke*, a 35.786 km sobre el nivel del mar en el plano ecuatorial, tienen un período de rotación de un día, por lo que dan la apariencia de estar fijos si se los observa desde la Tierra. Estos satélites, llamados geoestacionarios, son muy solicitados para una gran cantidad de servicios de comunicaciones. Sin embargo, estas tecnologías tienen algunas limitantes, entre las que cabe destacar su costo,⁶¹ número reducido de posiciones orbitales disponibles⁶² y duración de la transmisión.⁶³ Como respuesta, se ha propuesto lanzar redes o constelaciones de satélites en órbitas mucho más bajas, a centenares de kilómetros sobre el nivel del

⁶¹ Una vez lanzado el satélite, ya no puede ser recuperado para su reparación; por eso estos dispositivos son construidos acorde con los más altos estándares de confiabilidad. Además, tienen un tiempo de vida limitado de alrededor de 10 años. Este tiempo depende, fundamentalmente, de la cantidad de combustible consumido por los motores que se utilizan esporádicamente para mantener al satélite en su posición.

⁶² Existe un número limitado de posiciones orbitales en el *cinturón de Clarke*, que son arbitradas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones. Para poder utilizar los servicios de un satélite determinado, es claro que éste debe ser “visible” desde la Tierra. Por otra parte, algunas de las bandas de frecuencias utilizadas en las comunicaciones satelitales son muy vulnerables a las condiciones atmosféricas, y la calidad de las comunicaciones se ve degradada.

⁶³ El tiempo que tarda una señal en recorrer la distancia al satélite y de regreso es de aproximadamente 240 mseg. Este retraso puede ser muy significativo para algunas aplicaciones, como juegos en línea, telemedicina y aplicaciones de voz de alta calidad.

mar (LEO, *low earth orbit*). A estas distancias, los satélites tienen un período de rotación mucho menor a 24 horas, por lo que debe haber varios de ellos orbitando simultáneamente si se desea tener contacto permanente. Se han propuesto varios proyectos de constelaciones satelitales como Iridium, Teledesic, Globalstar y Skybridge, pero la mayoría han sido abandonados. Iridium, quizás el más conocido, comenzó a funcionar en 1998, pero entró al proceso de reestructuración por quiebra en 1999. En 2001 se reinició su operación bajo un nuevo consorcio y ahora es más estable gracias a grandes contratos con clientes como el Departamento de Defensa de Estados Unidos. Otra alternativa que está cobrando más importancia es el uso de plataformas a gran altitud (HAP, *high altitude platform*). Se trata de una propuesta para utilizar aviones no tripulados que vuelen en un radio corto a 20 km de la superficie terrestre que, al igual que un satélite, refleja las señales enviadas en su radio de cobertura, de alrededor de 500 km. Estas plataformas serían operadas con energía solar y se estima que podrían tener una autonomía de un año (Bray y Mahony, 2006). La Unión Europea está financiando el proyecto Capanina⁶⁴ para evaluar e implementar un sistema HAP. Entre las ventajas que se mencionan sobre estas tecnologías cabe destacar las altas tasas de transmisión, el bajo costo (10 veces menor que el de un satélite geostacionario) y el despliegue rápido con acceso a lugares remotos.

Redes de equipos cognitivos de radio

Un área que ha despertado bastante interés es el uso de interfaces de radio configuradas por *software* (SDR, *software defined radio*), es decir, interfaces que pueden elegir sus frecuencias de operación por medio de un programa informático. Bajo esta definición se ubican los teléfonos celulares multibanda que pueden operar en distintas redes, como *WiFi*, GSM o WiMax, y que seleccionan el servicio en función de la cobertura, el costo y los criterios del usuario (Vázquez y otros, 2006). En esta categoría entran también los equipos cognitivos o ágiles de radio, con los cuales se busca utilizar más eficientemente el espectro radioeléctrico mediante la detección y operación de bandas de frecuencia no utilizadas. Por ejemplo, dos terminales con equipos cognitivos de radio, podrían detectar que en cierta región un determinado canal de UHF no está siendo utilizado, y lo tomarían para su comunicación. Si en algún momento detectan que hay transmisión en esa frecuencia, en cuestión de microsegundos saltarían a otro canal o a otra banda que estuviera libre.

La gran motivación detrás de este modelo de configuración y reasignación dinámica de ancho de banda, es que permitiría un aprovechamiento óptimo del espectro, un recurso escaso y muy desperdiciado en ciertas regiones, como las bandas para televisión UHF y para televisión digital (Faulhaber y Farber, 2002). Como puede inferirse, para que este modelo se implemente en todo el espectro, sería necesario revisar el marco regulatorio, porque en la mayoría de los países se asignan regiones del espectro a servicios específicos (radiodifusión, televisión, telefonía celular, entre otros)

⁶⁴ <http://www.capanina.org>

siguiendo las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, y sin permitir que esas frecuencias se utilicen para otros servicios. Aun si las autoridades locales cuentan con políticas de uso flexible para las regiones concesionadas, la puesta en operación de equipos cognitivos de radio podría requerir de acuerdos comerciales entre un número importante de concesionarios (Faulhaber y Farber, 2002).

2. Red de transporte de siguiente generación (NGN)

La red de transporte es la infraestructura que utilizan los operadores para interconectar los equipos en sus instalaciones (centrales, telefónicas, puntos de presencia) y prestar servicios a sus clientes. Típicamente, la infraestructura de red de los operadores, y en particular de los grandes operadores, reflejaba claramente la evolución de las redes de comunicaciones: el despliegue de grandes cantidades de fibra óptica para atender la creciente demanda de ancho de banda de los usuarios, y una serie de plataformas superpuestas orientadas a servicios específicos, como conmutadores de circuitos para telefonía, conmutadores de paquetes y de circuitos virtuales para servicios de datos (*frame relay* e IP), conmutadores ATM para unir ambos, y otros. La administración de todas estas redes resultaba muy costosa y muy ineficiente. Ante un mercado sumamente competitivo, una migración en las preferencias de los usuarios hacia servicios de datos y, sobre todo, la demanda de nuevos servicios, los operadores se han visto en la necesidad de adoptar estrategias que les permitan maximizar su infraestructura, minimizar sus costos y agilizar la puesta en operación de servicios de valor agregado con alta rentabilidad.

La base óptica

Debido a las enormes ventajas que ofrece la fibra óptica para transportar información y a la creciente demanda de capacidad, durante los años noventa la gran mayoría de los operadores cambió su infraestructura de cable y microondas a enlaces de fibra óptica. Típicamente, estos enlaces integran anillos metropolitanos SONET/SDH y mallas que conectan estos anillos (Hurtado, Lobo y Pérez, 2006). En esa década se lograron también grandes avances en tecnologías de multiplexación por división de longitud de onda (WDM, *wavelength division multiplexing*). Esta tecnología permite enviar varias portadoras con distintas longitudes de onda⁶⁵ a través de la misma fibra, con lo que aumenta enormemente su capacidad. A finales de los años noventa, WDM denso, DWDM, permitía transportar hasta 160 portadoras espaciadas a intervalos de 25 GHz, con lo que se alcanzan tasas de 80 Gb/s por fibra. En la fibra, los haces se envían en regiones del espectro en los que la atenuación óptica es menor; la primera de estas regiones, llamadas ventanas, se encuentra alrededor de los 850 nanómetros. Más adelante se empezaron a utilizar ventanas en los 1.310 nm y 1.550 nm que tienen

⁶⁵ Informalmente suele decirse que se transportan haces de distintos colores, aunque en realidad las señales están fuera del espectro de luz visible.

una atenuación menor. Actualmente se encuentran en desarrollo sistemas capaces de operar en una cuarta ventana cercana a los 1.625 nm. Entre las ventanas de 1.310 nm y 1.550 nm existía una zona de absorción de partículas OH conocida como el pico de agua. Las técnicas de construcción de fibra actuales han permitido la eliminación de ese pico, proporcionando una ventana continua de 1.260 nm a 1.625 nm; una capacidad de 54.000 GHz en la que pueden insertarse hasta 1.000 portadoras distintas. Si se considera que en cada portadora se pueden enviar 2.5 Gb/s y que un cable contiene cientos de fibras ópticas, se entenderá por qué en la actualidad se considera que existe una enorme capacidad de fibra desplegada.

Otro aporte significativo que se produjo a finales de los años noventa fue la fabricación de amplificadores ópticos que compensan las atenuaciones de las señales sin tener que pasarlas al dominio eléctrico para su regeneración, ya que la conversión óptica-eléctrica-óptica introduce severos retrasos en la propagación de la información. Los amplificadores ópticos más comunes están formados por fibras dopadas con tierras raras, principalmente erbio, cuyos iones proporcionan una ganancia óptica cuando son estimulados por un láser de alta potencia. Estos amplificadores operan solamente en la ventana de 1.550 nm, pero recientemente se han introducido los amplificadores de efecto Raman, en los cuales la fibra misma tiene un efecto amplificador en cualquier ventana cuando se inyecta un láser con las características adecuadas (Hurtado, Lobo y Pérez, 2006). Típicamente, en las redes de fibra óptica se utiliza un modo de conmutación de circuitos: la trayectoria que recorre la información del origen al destino, se configura con anterioridad en los nodos de conmutación. Por lo general, se trata de dispositivos electrónicos, aunque existen dispositivos con los cuales se pueden realizar conmutaciones en el dominio óptico por medio de microespejos MEMS (*microelectromechanical systems*) que dirigen el haz hacia el puerto de salida correspondiente. La siguiente evolución contemplaría dispositivos capaces de conmutar dinámicamente, en los que las ráfagas de información fueran encontrando la ruta hacia su destino conforme se propagan dentro de la red óptica.

Para los operadores, una infraestructura de red totalmente óptica resulta muy atractiva, ya que además de su enorme capacidad, disminuye el número de equipos óptico-electrónicos en la red y, con ellos, el costo de operación, mantenimiento y consumo de energía. Sin embargo, no se espera un despliegue masivo totalmente óptico en el núcleo de los operadores en el corto plazo por varias razones. En primer término, con las tecnologías DWDM, en los países desarrollados no parece haber necesidad de más capacidad en el corto plazo; en segundo lugar, y más importante aún, esta red debe tener una muy alta disponibilidad, por lo que se tenderá a incorporar únicamente tecnologías bien conocidas y de probada fiabilidad (Hurtado, Lobo y Pérez, 2006; Blumenthal, Bowers y Partridge, 2005).

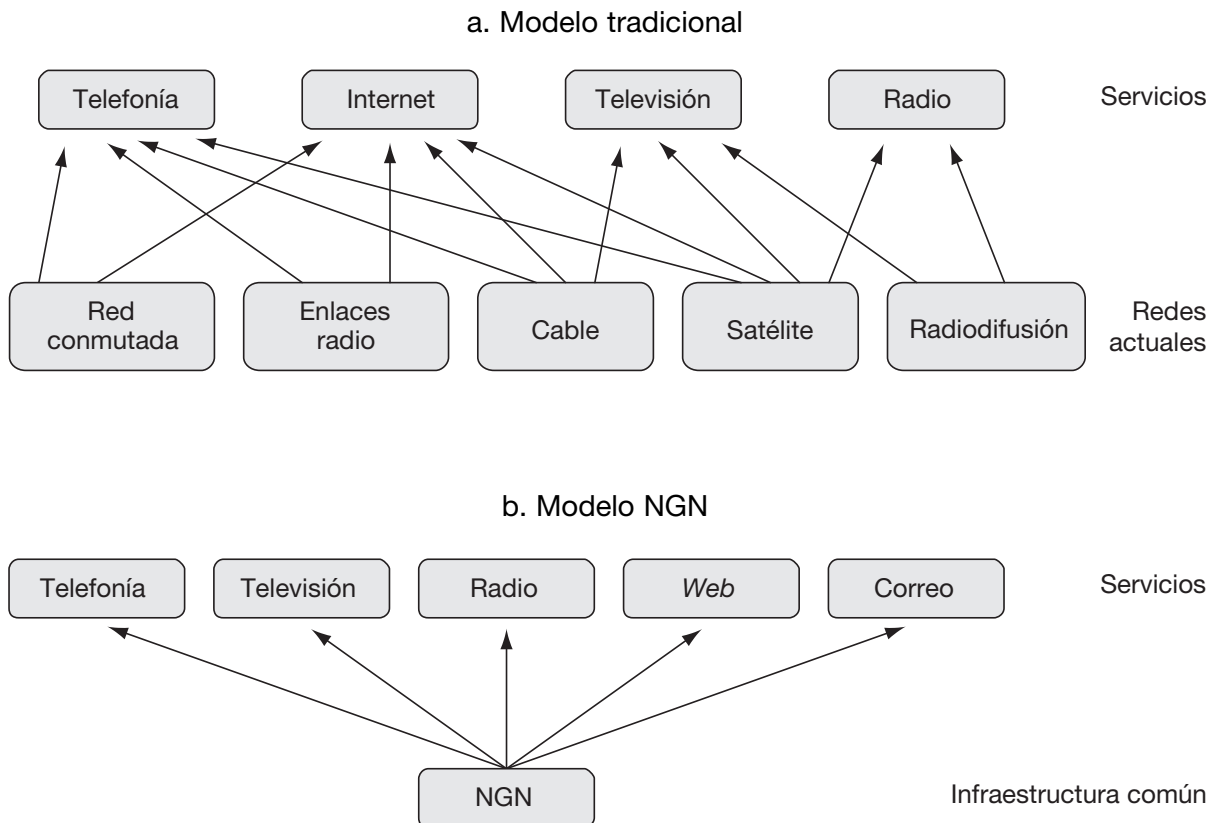
Redes de siguiente generación (NGN)

El concepto de NGN (*next generation network*) consiste en crear una arquitectura donde todos los servicios puedan ser entregados mediante una única red conmutada por paquetes. Una consolidación horizontal de este tipo ofrece ventajas como la

reducción de costos de operación y mantenimiento, la convergencia de diferentes servicios y redes, y la puesta en marcha de nuevos servicios combinados. Una red NGN debe responder a las exigencias de fiabilidad, disponibilidad, calidad y capacidad de las redes tradicionales. La UIT (2004) define a una NGN como una red de paquetes conmutados para proveer servicios que incluyen la telecomunicación, capaz de utilizar múltiples tecnologías de transporte de banda ancha con mecanismos de calidad de servicio (QoS, *quality of service*), y donde las funciones relacionadas con el servicio son independientes de las tecnologías de transporte de bajo nivel. En otras palabras, se ofrece acceso irrestricto por parte de los usuarios a diferentes proveedores de servicio (gráfico 12.4).

Es importante resaltar las diferencias entre internet y una NGN. A pesar de que ambas puedan utilizar el protocolo IP como elemento aglutinador de servicios, en el modelo de internet la red es transparente y los servicios se proveen mediante dispositivos conectados a los extremos. En cambio, en una NGN los proveedores y el operador controlan el acceso a los servicios y recursos de la red, que pueden ser cobrados a los usuarios. A cambio de este ambiente controlado, los usuarios obtienen niveles de calidad de servicio y autenticación única (Knightson, Morita y Towle,

Gráfico 12.4
MODELOS DE SUMINISTRO DE SERVICIOS



2005). Por tanto, en una NGN, los operadores añaden valor al uso de su red dejando de ser simples conductos de *bits* (Cuevas y otros, 2006). Los operadores de red se desplazan al centro de la cadena de valor. La recomendación Y.2011 de la UIT define un modelo de alto nivel de una arquitectura NGN (UIT, 2004-2). Este modelo contempla un plano de servicios separado de un plano de transporte, y cada uno de esos planos define funciones que pueden ser utilizadas para la composición final de servicios. Lo que esta arquitectura no define, es un plano de control y señalización, que puede ser proporcionado por la plataforma IMS.

Una de las tecnologías propuestas para la construcción de una NGN es *IP multimedia subsystem* (IMS), una plataforma definida por el consorcio 3GPP como parte de la especificación UMTS Release 6 (3G Américas, 2005). IMS define una capa de control por encima de redes móviles y fijas basadas en IP que permite la provisión de servicios multimedia. Originalmente diseñado para redes celulares, ahora incorpora mecanismos para la integración de cualquier tecnología de acceso a la red. IMS utiliza protocolos de internet y estándares abiertos. La base de IMS se compone de IPv6 como protocolo de red, el protocolo SIP (*session initiation protocol*) para la señalización y control de sesiones y los protocolos RTP y RTCP (*real time transmission protocol* y *real time control protocol*) para los intercambios multimedia. Se divide en tres planos: transporte, control y servicio. Los planos de transporte y control se relacionan directamente con la entrega del servicio; entre sus funciones está la negociación de la calidad, la autenticación de usuarios y la gestión de la sesión. En el plano de servicio se definen los mecanismos para la comunicación por medio de mensajería, voz o videoconferencia.

Algunos de los grandes operadores están muy interesados en IMS (Duffy, 2007). En contrapartida, diversos analistas cuestionan este modelo, porque además de los servicios ofrecidos, los operadores controlan el acceso a internet y pueden monitorear, bloquear el ingreso, hacer cobros preferenciales y dirigir el tráfico a los sitios de proveedores con quienes tienen relaciones comerciales (Waclawsky, 2005). Como se verá en la siguiente sección, estas acciones tienen el potencial de cambiar radicalmente internet tal como se conoce hoy a la red.

c. *El espectro radioeléctrico*

Con ayuda de una antena, en los sistemas de comunicación inalámbrica se utilizan ondas electromagnéticas que se propagan por el aire para enviar información del transmisor al receptor. En general, estas ondas se transmiten sobre una señal de radio llamada portadora, con una frecuencia particular. El espacio o espectro radioeléctrico es el subconjunto de radiaciones electromagnéticas y cuyo uso se destina fundamentalmente para la difusión de información por el espacio terrestre libre, tanto en emisiones digitales como analógicas. El espectro radioeléctrico es un recurso natural limitado y por tanto requiere de una gestión y una racional administración. En este sentido, la combinación de procedimientos administrativos, científicos y técnicos que garanticen una explotación eficaz del equipo y los servicios de radiocomunicaciones sin producir interferencia perjudicial, es lo que podría calificarse como gestión del espectro.

1. La gestión del espectro radioeléctrico⁶⁶

Con el fin de evitar interferencias entre las distintas comunicaciones, es necesario contar con un marco que regule la utilización del espectro. En general, éste se divide en rangos o bandas que se asignan a distintos usos (lo que se conoce como cuadro de atribución de frecuencias) y dentro de una banda, las frecuencias particulares se atribuyen, a través de distintos mecanismos, a operadores o usuarios específicos. Normalmente el marco regulatorio también establece los parámetros de operación (como la potencia de transmisión para reutilizar frecuencias en diferentes regiones, o el uso de distintas técnicas de codificación para evitar interferencias), y las medidas para evitar la concentración monopolística de servicios. En la gran mayoría de los países esta tarea es realizada por entes que reglamentan el sector.

Sin perjuicio de la soberanía de cada país, como marco de referencia internacional para la administración del espectro radioeléctrico, se aplica el reglamento emitido por la Unión Internacional de Telecomunicaciones. El artículo 5 de dicho ordenamiento establece el cuadro de atribución de bandas de frecuencias, que es tomado como referencia por cada administración para emitir sus respectivos cuadros nacionales. Entre las principales ventajas de la homologación de los cuadros nacionales de frecuencias se encuentran economías de escala en la fabricación de equipos y la coordinación de uso en las zonas fronterizas; de esta manera se evitan interferencias perjudiciales y se facilita el *roaming* a nivel internacional.

Debido a la naturaleza jurídica del espectro radioeléctrico, considerado como un bien de dominio público, los gobiernos de los diferentes países establecen en su legislación la manera en que permitirán la utilización del espectro a agentes privados. En este sentido, es común que los cuadros nacionales también determinen la clasificación de cada una de las bandas de frecuencias, como por ejemplo de uso libre (conocidas generalmente como bandas para investigación industrial, científica y médica, ICM), de uso comercial (sujeto a concesión), reservada para el Estado, y otras.

En cuanto al espectro que requiere concesión gubernamental, en cada país se utilizan diferentes esquemas para asignar los derechos de su explotación. Por un lado existe la alternativa de subastas. Este modelo consiste en realizar un proceso mediante el cual cada uno de los interesados ofrece una contraprestación económica en cada una de las rondas, y al final el espectro es asignado a quien realizó la mejor oferta económica. Por otro lado, existe la alternativa de concursos. Mediante este proceso se requiere a los interesados presentar sus proyectos para la utilización del espectro, y éste se asigna al participante que garantice las mejores condiciones, como por ejemplo, menores tarifas y mayores compromisos de cobertura. Con respecto a lo anterior, existe un gran debate sobre cuál esquema es el que garantiza el uso más eficaz del espectro y el mayor beneficio para la sociedad.

⁶⁶ Esta sección ha sido elaborada por Javier Juárez Mojica, director general de Proyectos y Resolución de Acuerdos, Comisión Federal de Telecomunicaciones de México.

Quienes están a favor de la subasta consideran que es una de las maneras más objetivas de asignar el espectro porque –aseguran– al final del procedimiento el recurso será obtenido por quien ofrezca una mejor postura, sin dejar espacio a la subjetividad, considerando además que la mejor oferta reflejará el valor real de mercado. Quienes están en contra de este mecanismo sostienen que se limita la autorización del espectro a los sectores con mayor poder económico y, por tanto, restringe el acceso a un recurso de dominio público e impone barreras a su democratización. Por su parte, quienes apoyan los concursos aseveran que el Estado no debe considerar este recurso con fines meramente fiscales y recaudatorios, porque al asignar el espectro al mejor proyecto, se garantiza el mayor beneficio social; los agentes no tendrán que recuperar, mediante sus tarifas al público, el alto costo que en su caso tendrían que pagar por adquirir los derechos de explotación. Como ejemplo, los partidarios de este esquema señalan el caso de las subastas de espectro para redes de tercera generación (3G) en Europa, una experiencia que demuestra que en los países en los que se pagó una mayor cantidad por el espectro, existen menores índices de penetración y mayores tarifas a los usuarios. Los detractores de este mecanismo señalan que no está exento de vicios de discrecionalidad al momento de calificar cuál es el proyecto que garantiza las mejores condiciones.

Además de los mecanismos de asignación, existe un debate de fondo relativo a las dinámicas introducidas por los cambios de la convergencia de las redes. Este debate incluye temas de eficiencia en el uso del espectro, como la discusión sobre su comercialización (*spectrum trading*) y la consolidación de tecnologías digitales, así como la masificación de técnicas de espectro disperso (*spread spectrum*), UWB (*ultra wide band*), SDR (*software defined radio*), por mencionar sólo algunas. Con la finalidad de garantizar el pleno desarrollo del paradigma digital, los organismos reguladores enfrentan el desafío de vigilar que sus políticas de administración no restrinjan la incorporación oportuna de los adelantos tecnológicos y que todos los ciudadanos puedan disponer de manera equitativa de dicho recurso. Así, se garantizará el acceso a la información y al conocimiento, para que los usuarios puedan desarrollar su pleno potencial y mejorar la calidad de sus vidas de manera sostenible. En otras palabras, el espectro debe consolidarse como el catalizador del acceso universal que ayude a superar el cuello de botella que, en la mayoría de los países de la región, existe en las redes.

2. Desafíos para la gestión del espectro ante la convergencia digital⁶⁷

El impacto de la convergencia de redes, servicios y terminales en los nuevos modelos de negocios relativos a las TIC, principalmente al expandir la demanda de servicios basados en terminales inalámbricos, ha producido una creciente y dinámica demanda sobre el espectro radioeléctrico. Por ejemplo, se ha observado que el despliegue de

⁶⁷ Esta sección ha sido elaborada por Ómar de León Boccia de Teleconsult.

video bajo demanda, que exige caminos individuales de información para cada usuario, si se presta sobre las redes móviles actuales, puede saturarlas: el espectro autorizado no será suficiente dentro de los patrones de diseño de las radiobases y sus alturas. Además, se considera importante desarrollar modelos de gestión que permitan emplear el espectro radioeléctrico como un vehículo para el despliegue de nuevas tecnologías y servicios, que le provean más valor a la ciudadanía por el uso de este recurso. Es en este sentido en el que se desarrollan en este momento en el mundo profundos cambios en la gestión del espectro. Estos cambios tienen fundamentos económicos y tecnológicos, que se manifiestan en la necesidad de ajustar los marcos regulatorios (De León, 2006).

Costumbres antiguas y tecnologías nuevas

El modelo de gestión del espectro vigente en la mayoría de los países tuvo su origen en una época en la que el comportamiento del mercado era muy estable, y además estaba segmentado en sectores muy definidos, como eran la telefonía fija, la transmisión de larga distancia, los servicios de telefonía móvil y la radioteledifusión. En esta época fue un modelo eficaz y dio resultados importantes en el desarrollo ordenado del uso del espectro. Esta gestión se orientaba principalmente a lo que era la administración estatal de un recurso escaso,⁶⁸ a la protección contra interferencias y a la coordinación internacional de determinadas bandas. Este modelo centralizado, también llamado modelo de gestión administrativa, basado en normas rígidas, conocido actualmente como modelo de comando y control, no se adecuaba a las necesidades actuales que surgen de un gran dinamismo del mercado, con tecnologías altamente evolutivas que alcanzan frecuencias muy altas sin mayores problemas, y mercados convergentes muy innovativos en cuanto a modelos de servicios y tecnologías. “En el entorno actual de rápidos cambios tecnológicos y de mercado, se observa a las administraciones centralizadas como lentas para reaccionar, ineficientes y orientadas hacia el *statu quo* y los intereses de los operadores establecidos. Contribuyendo más a esta rigidez inherente del sistema regulatorio, la creciente digitalización de la información y las comunicaciones y la convergencia tecnológica, han resultado en el borrado de las definiciones de las fronteras de los servicios tradicionales, a lo largo de las cuales los reguladores atribuyeron el espectro. Donde se observaban como separados diferentes servicios tradicionales de radiocomunicaciones, involucrando diferentes atribuciones de espectro, una única plataforma puede en este momento ser usada para prestar una variedad de servicios a los usuarios” (UIT, 2004).

La mencionada rigidez se manifiesta en diferentes aspectos de la gestión actual del espectro. La que podría llamarse microgestión, es quizás una de las principales limitaciones macro, que refleja el modelo de comando y control. Por eso las autorida-

⁶⁸ Es importante recordar que el espectro útil llegaba hasta frecuencias del orden de 1 GHz, con usos en enlaces fijos en frecuencias hasta el orden de los 10 a 12 GHz.

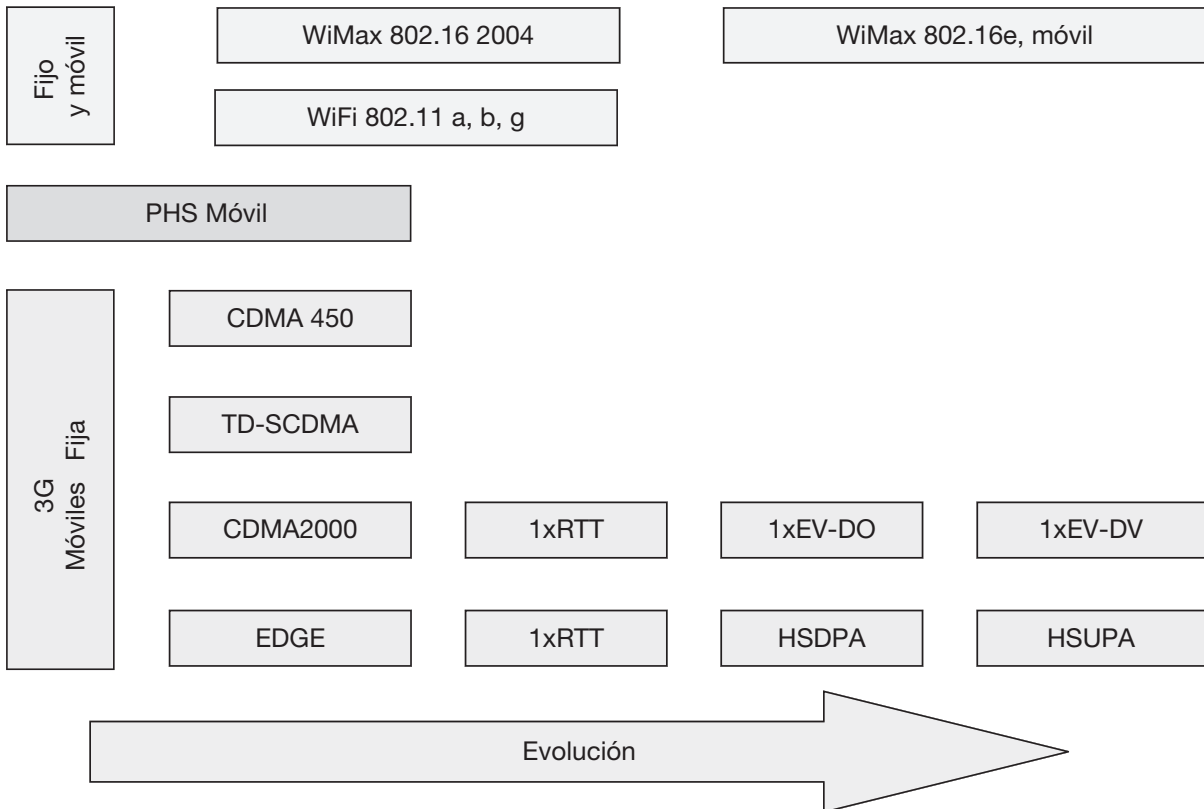
des regulatorias establecen y controlan detalles sobre las condiciones del uso, lo que produce interferencias importantes en el mercado y sobrecarga de trabajo regulatorio a la autoridad. Entre los modelos alternativos para esta microgestión se encuentran el mercado secundario del espectro, el uso libre del espectro en ciertas bandas, y otros. En el mercado secundario del espectro se comercializan los derechos de uso, lo que deriva en acciones típicas de cualquier derecho de propiedad. Se permite que las bandas del espectro se encaminen naturalmente hacia los usos que agreguen más valor, ya que quien le dé más valor será quien pague más por él. Otro aspecto es la rigidez en la atribución y asignación de bandas de espectro. Esta rigidez surge principalmente de las limitaciones que existen para algunas bandas en cuanto a la tecnología a usar o el servicio a prestar. Un caso puede ser cuando se prohíbe a los operadores inalámbricos prestar servicios de televisión. Uno de los aspectos más antiguos de la gestión del espectro es la diversidad de regulaciones nacionales, un debate que actualmente está centrándose, entre otros temas, en el apagón analógico de la televisión y la asignación del espectro para el uso de tecnologías digitales.

Mientras las tecnologías inalámbricas han pasado a ser la base de las telecomunicaciones, un gran número de tecnologías para el acceso inalámbrico fijo y móvil están constituyendo –progresivamente y en conjunto– servicios sustitutos de los servicios fijos de acceso por par de cobre, a la vez que todos se integran al mismo mercado. En el diagrama 12.1 se muestra un resumen de las principales tecnologías inalámbricas en los accesos, que están produciendo cambios muy importantes en el desarrollo de las TIC, como vehículo de la voz, la imagen, el video, las aplicaciones y el contenido (De León, 2006).

En cuanto a las tecnologías propias de la convergencia que permiten el uso transparente de las redes, los accesos y las terminales, se distingue principalmente la IMS (*IP multimedia subsystem*), que es una arquitectura para el control e integración de servicios multimedia a través de múltiples plataformas. Permite la provisión de múltiples servicios sobre el protocolo IP, integra redes de conmutación de paquetes y de circuitos, y permite principalmente operar en forma transparente y concurrente sobre cualquier tecnología de acceso fijo o inalámbrico. Esta arquitectura es una de las que más impulsan el despliegue de gran cantidad de tipos de accesos inalámbricos.

Por otra parte, entre las tecnologías inalámbricas de impacto a mediano plazo en la gestión del espectro se encuentra la UWB (*ultra wide-band*), que es una tecnología *spread spectrum* sobre la que existen recomendaciones de la UIT, que emplea muy baja potencia pero sobre grandes anchos de banda, destinada al uso en distancias cortas, y que permite a varios usuarios compartir la misma banda al mismo tiempo. El objetivo es emplearla por debajo del nivel de ruido de tecnologías preexistentes en una determinada banda, en lo que se llamaría el espectro subyacente (*underlay*). También resultan importantes las antenas inteligentes y las adaptivas, en las que se pueden modificar los diagramas de radiación para optimizarlos en las direcciones requeridas; los transceptores ágiles que pueden modificar su frecuencia de emisión considerando las condiciones actuales de uso del espectro; el *spread spectrum* en general y en sus varias versiones, tecnología ya muy conocida pero con variantes permanentes; y otras, que están siendo tomadas en consideración en la gestión de inter-

Diagrama 12.1
PRINCIPALES TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS EN LOS ACCESOS



Fuente: De León, Ómar (2006), Análisis crítico del sector de las telecomunicaciones: recomendaciones para el desarrollo de un nuevo modelo regulatorio para Iberoamérica, Madrid, Asociación Iberoamericana de Centros de Investigación y Empresas de Telecomunicaciones (AHCET).

ferencias, para aprovechar el espectro de manera más eficaz. En conclusión, las más recientes tecnologías funcionan en forma muy innovadora y permiten un uso más intenso del espectro al reducir los efectos de las interferencias.

Acompañando esta evolución de las tecnologías, los modelos de negocio han ido cambiando, volviéndose más dinámicos y complejos, con un comportamiento bien distinto del observado hace una década o menos; tienen un tiempo de vida más corto, están dirigidos a nichos del mercado, y además cambian constantemente. En lo que hace más compleja la situación, estos modelos incluyen actualmente empresas de varios rubros, como los operadores tradicionales de telecomunicaciones, los proveedores de equipos y *software*, los de contenido y los de aplicaciones, que se adaptan permanentemente y dan lugar a cambios en la estructura de la industria.

Desafíos en la reglamentación

Desde este punto de vista, la gestión debería evolucionar para acompañar el perfil de las actividades que emplean el espectro. Estos cambios son necesarios para hacer un uso más efectivo y dinámico, tanto para el suministro de los servicios finales de mayor valor para los usuarios, como para ofrecer acceso a la sociedad de la información con carácter de universalidad. A continuación se plantean algunos de los debates actuales que afectan los cambios requeridos por las tecnologías y principalmente por los servicios, y los nuevos modelos de negocio en la gestión del espectro (De León, 2006).

Bajo el principio de la aplicación de la seguridad legal, los derechos adquiridos⁶⁹ que ya han sido incluidos en el patrimonio de una persona física o jurídica no deberían ser modificados por una norma posterior, al menos sin una compensación aceptada por el titular del derecho adquirido. Este principio establece ciertas restricciones en los cambios, tanto en profundidad como en plazos que necesariamente deberían ser considerados en estos procesos.

La asimetría en la reglamentación entre los sectores de las telecomunicaciones y de la radiodifusión se manifiesta de distintas formas en los diferentes países, como por ejemplo a través de limitaciones legales o hasta constitucionales (limitación en cuanto a la propiedad de la empresa para transmitir televisión), la existencia de distintas autoridades regulatorias que aplican diversos criterios o de la prohibición explícita de prestar servicios de telefonía o acceso a internet por medio de las redes de cable. Esta asimetría acarrea ineficiencias en general, y en el uso del espectro en particular.

La liberalización del uso del espectro, en cuanto a las tecnologías que se van a emplear o a los servicios para los cuales se va a usar, así como en cuanto a la posibilidad de transferir los derechos de uso, está acompañada por una liberalización general de la regulación del sector (interconexión, licenciamiento, calidad de servicio, entre otros). Además, existe un conjunto de tecnologías emergentes, como la ya mencionada UWB, las antenas adaptivas y otras, que contienen las debidas precauciones para evitar interferencias, que de todas maneras –cuando ocurran– serán menos intensas que en la actualidad. Debido a la reconocida asimetría intrínseca de la información que existe entre las autoridades regulatorias y los operadores del mercado, se produce una discusión acerca de la opción de retirar progresivamente al regulador de la tarea de la gestión detallada, y transferir el uso del espectro a las empresas (aunque estarían sujetas a supervisión y control).

Como una de las medidas para reducir la carga del regulador, se plantea que la asignación de frecuencias podría evolucionar paulatinamente –al principio, cuando se asignen nuevas bandas– hacia el llamado “modelo de derechos exclusivos de uso” claramente definidos y amplios, que puedan ser comercializados en el mercado, y

⁶⁹ Se entiende que constituyen derechos adquiridos las situaciones jurídicas individuales que han sido establecidas y consolidadas por la aplicación de una ley, y que por esa razón se consideran incluidas definitivamente o pertenecen al patrimonio de una persona.

hacia el “modelo de acceso común o abierto”. Por medio de estas dos vertientes nuevas de modelos de gestión se entiende la tendencia de abandonar el modelo actual de comando y control; el modelo de derechos exclusivos es el que habilita luego el desarrollo del mercado secundario. Este modelo permite que el usuario A, que disponga de derechos exclusivos de uso del espectro, pueda transferirlos total o parcialmente a otra parte B, que le otorgue más valor. Este mayor valor, es el reflejo del valor que también los clientes de B le otorgarán a los servicios a prestar, produciendo de esta manera una escalada del valor obtenido por el uso del espectro. El “modelo de acceso común o abierto” permite que en determinadas bandas cualquier usuario o grupo predefinido de usuarios pueda hacer uso del espectro, si respeta determinadas condiciones técnicas mínimas de compatibilidad. De esta manera se apunta al uso efectivo para las condiciones que se definan, se habilita la democratización del espectro, y además se estimula la aplicación de nuevas tecnologías y el suministro de servicios innovadores. En Estados Unidos existe además el modelo de “*private commons*”, en el que un poseedor de derechos exclusivos puede usar sus bandas para proveer, bajo su responsabilidad, acceso común a terceros.

La armonización internacional resulta importante desde diversos puntos de vista. Tradicionalmente esta homologación se llevó a cabo para asegurar la compatibilidad en el uso del espectro en los diferentes países, y evitar principalmente las interferencias dañinas. Actualmente las tendencias más avanzadas apuntan además hacia la orientación económica en la armonización, de forma de ganar economías de escala para el uso y la producción de sistemas y equipos, lo que fortalece la posición regional en el ámbito mundial. La Unión Europea es líder en la aplicación de este concepto, con el que también se plantea evitar que en los procesos de armonización se perjudique la eficiencia a nivel nacional.

d. Internet, la red de redes

Internet ha sido un éxito incuestionable y un fenómeno sorprendente. Pensada originalmente para compartir archivos y recursos, acceso y colaboración remota, de ella han surgido aplicaciones que han transformado a nuestra sociedad. El éxito de internet se explica en gran medida por determinadas decisiones fundamentales con las que fue diseñada (Saltzer, Reed y Clark, 1984). Su objetivo primordial es interconectar redes heterogéneas entre sí (de ahí su nombre) de manera sencilla. Para ello, todos los dispositivos conectados deben “hablar” y “entender” un “lenguaje” común: un protocolo entre redes, el “*Inter-net Protocol*”, o IP. Al homologar las comunicaciones con IP, se ocultan las características físicas y tecnológicas de las redes individuales y se logra la conectividad global entre ellas. Esta característica permite, además, incorporar cualquier nueva tecnología de conexión. Por otra parte, se trata de una arquitectura sencilla, abierta, descentralizada y distribuida, que funciona sobre la base de protocolos de uso libre, con un conjunto de investigadores que aportan constantemente nuevos mecanismos y validan los ya existentes.

Otra consideración de diseño es que cualquier red estaría sujeta a fallas de transmisión impredecibles, por lo que la responsabilidad para garantizar la integridad de

las comunicaciones se delega a los equipos terminales por medio del protocolo TCP. Los nodos al interior de la red, llamados enrutadores, carecen de la inteligencia para coordinar una conversación entre dos dispositivos, y su única función es encaminar los datagramas que conforman la conversación hacia sus respectivos destinos. Para comunicarse, cada dispositivo necesita de un identificador único llamado “dirección IP”, que está formado por dos partes: un identificador de la red a la que está conectado el dispositivo y un identificador de su interfaz en esa red. Los enrutadores intercambian periódicamente anuncios sobre las redes que conocen, con lo que cada uno va formando un criterio sobre la trayectoria que deben seguir los datagramas para alcanzar una red determinada y, de ahí, el equipo terminal del destinatario. Sobre esta infraestructura simple de interconexión, se ofrecen en los extremos de la red todos los servicios que se utilizan cotidianamente, como el correo electrónico, la mensajería instantánea, los servicios P2P, el comercio electrónico, la navegación en diversos portales y la telefonía por internet.

1. Problemática de una red que no fue pensada para lo que es

Estos principios de diseño y la gran creatividad de miles de investigadores han permitido que durante más de treinta años internet crezca hasta convertirse en la mayor plataforma de acceso a información y comunicaciones que jamás haya existido. Para esto era necesario resolver algunos retos encontrados durante su evolución. Algunos ejemplos sobresalientes son la incorporación en los años ochenta de mecanismos adaptables en los protocolos de transporte para control de congestión; la definición en los años noventa de arquitecturas de calidad de servicio para proteger el intercambio de aplicaciones multimedia y de misión crítica; la creciente puesta en marcha de mecanismos de seguridad para proteger la privacidad de las comunicaciones y la integridad de la infraestructura; y la definición de un nuevo protocolo de red (IPv6) para garantizar el crecimiento de internet.

Las direcciones IP utilizadas en la actualidad, tienen una longitud de 32 *bits*, con lo que, en principio, se podrían asignar más de 4.000 millones de identificadores únicos; un número bastante significativo para la época en que fue definido el protocolo IP. Sin embargo, debido a las políticas iniciales de asignación de direcciones y al totalmente inesperado crecimiento de la red, a principios de los años noventa se observó que las direcciones IP podrían agotarse muy rápidamente. El mundo científico planteó varias alternativas, entre las que cabe destacar: a) una política mucho más restrictiva de asignación de direcciones; b) la definición y uso de bloques de direcciones privadas para ser utilizadas al interior de las organizaciones, junto con un esquema dinámico de traducción a direcciones públicas para aquellos intercambios que debían pasar por internet; c) la definición de una nueva versión del protocolo de red, IPv6. IPv6 ofrece un espacio de direcciones varios órdenes de magnitud mayores al disponible actualmente. La longitud de una dirección es de 128 *bits*, que de acuerdo con algunas estimaciones pesimistas, permite contar con más de 1.500 direcciones únicas por metro cuadrado de la superficie terrestre (Hinden, 1995). Infortunadamente, IPv6 no es compatible con su predecesor, por lo que su despliegue requiere de

mecanismos para la coexistencia temporal de ambos protocolos, que se traduce en mayores costos de mantenimiento y gestión. Esto, aunado al hecho de que en Estados Unidos el problema del agotamiento de direcciones no es tan grave, ha provocado que el despliegue de IPv6 sea particularmente lento en ese país, a diferencia de países como República de Corea y Japón, donde ha adquirido una atención especial. En 2005, el gobierno de Estados Unidos decretó un plazo de tres años para que todos sus productos digitales fueran compatibles con IPv6, por lo que se espera un estímulo importante en la adopción del protocolo en el sector privado de ese país (Garretson, 2005).

Además de resolver el agotamiento potencial de direcciones, con IPv6 se buscaba hacer frente a otros problemas identificados en la época en que fue diseñado, en particular en las áreas de seguridad, calidad de servicio y movilidad. Lamentablemente, su despliegue ha sido mucho más lento que la velocidad a la que se ha transformado internet en los años recientes. A lo largo de su corta historia, internet pasó de ser una herramienta para compartir datos entre investigadores y académicos, a una megainfraestructura de acceso a información; de tener metas en común entre sus usuarios, a integrar grupos heterogéneos con intereses diversos e incentivos comerciales; de operar bajo relaciones de confianza, a una pérdida absoluta de ellas; de considerar la conectividad y la robustez como las características más importantes, a la existencia de intereses externos que vulneran la coherencia de la red.

Al ser la consecuencia de un desarrollo tan dinámico y turbulento, no es de sorprender que el resultado no sea perfecto (Talbot, 2005b). Por ejemplo, en su diseño, la seguridad no era un elemento prioritario. Los científicos poseían fuertes vínculos de confianza y un espíritu de colaboración muy distinto a los intereses que mueven a la red comercial de la actualidad. En la red actual, se han desplegado varios mecanismos como IPsec y TLS que protegen satisfactoriamente la privacidad e integridad de las comunicaciones, y posibilitan así el manejo de transacciones comerciales en la red. Sin embargo, el número de ataques documentados en forma de virus, usurpación de identidad, denegación de servicio, recepción de correo no deseado, entre otros, ha crecido de forma alarmante en los últimos años. Existen algunos servicios críticos, como el sistema de resolución de nombres de dominio (DNS, *domain name system*) que son especialmente vulnerables y, si fueran blanco de un ataque coordinado, la red podría colapsar (Albert, Jeong y Barabási, 2000).

Otro desafío actual es la falta de capacidad de explotar el potencial de tecnologías emergentes. Hacer posible que millones de sensores inteligentes compartan información es casi imposible. Más allá del limitado espacio de direcciones, que puede ser resuelto con IPv6, las características de comunicación inherentes a estos dispositivos son muy distintas a los intercambios de red convencionales y podrían provocar focos de congestión y retrasos intolerables. En la misma línea se encuentra el problema de la movilidad. Internet fue pensada para conectar dispositivos fijos y las soluciones propuestas para dar soporte a dispositivos que se mueven de una red a otra, demandan una gran cantidad de recursos, lo que limita severamente su escalabilidad. Este es un problema grave si se observa que el crecimiento más importante de dispositivos con capacidad de conexión a internet es precisamente el de los aparatos que facilitan

la movilidad: computadoras portátiles, agendas digitales y, sobre todo, teléfonos celulares.

Además, internet no fue diseñada pensando en configuraciones que simplificaran la detección de problemas y fallas en la red. En la actualidad, el mantenimiento y gestión de grandes redes demanda de personal altamente capacitado y con experiencia, lo que, por desgracia, en vez de garantizar una red libre de fallas, incrementa la posibilidad de que éstas ocurran: un gran porcentaje de fallas se debe a causas humanas.

2. Internet del futuro

Para muchos investigadores, la manera en la que se han resuelto algunos de los problemas anteriores, no representa más que paliativos de corto plazo que acentúan la complejidad de la red, la hacen cada vez más difícil de gestionar y mantener, y por tanto profundizan su fragilidad. Hay una postura que cobra cada vez más fuerza: es necesario crear tecnologías que vayan más allá de lo que ofrece IP o IPv6. Junto con otros investigadores de gran renombre, David D. Clark, uno de los ingenieros detrás del protocolo IP, considera que “*es tiempo de repensar la arquitectura básica de internet, de potencialmente comenzar con un diseño fresco e igual de importante, una estrategia para verificar su viabilidad, de manera que permita una oportunidad de implementación*” (Talbot, 2005a). Clark propone las siguientes metas para una posible internet del futuro: establecer una arquitectura básica de seguridad; permitir que cualquier dispositivo de cualquier tamaño pueda conectarse; diseñar protocolos que permitan a los proveedores de servicio mejorar el enrutamiento de tráfico y colaborar para ofrecer servicios avanzados sin comprometer sus negocios; añadir tecnología que haga a la red más fácil de gestionar y resistente a fallas y ataques; elevar los niveles de disponibilidad y alcanzar por los menos los niveles de la red telefónica.

Algunas investigaciones para construir esta arquitectura ya están en marcha a través de distintas iniciativas. Entre ellas cabe el hecho de que el gobierno chino desarrolla la red CNGI (*China next generation internet*) (CNGI). Uno de sus componentes, la red dorsal CERNET-2, conecta a 200 universidades y más de 100 institutos de investigación con tecnologías ópticas de vanguardia y con IPv6 como protocolo de red. La investigación realizada en la CNGI se enfoca al desarrollo de arquitecturas y tecnologías de calidad de servicio, servicios inalámbricos y móviles. Otro de sus objetivos es desarrollar tecnologías de bajo costo para incentivar el uso de internet. En Europa, el proyecto FIRE (*future internet research and experimentation*) (FIRE) tiene como objetivo asegurar la competitividad europea en la internet del futuro. Esta iniciativa conduce a la investigación de largo plazo para construir paradigmas y plataformas experimentales. En Estados Unidos, la *National Science Foundation* financia la construcción de una plataforma de pruebas con la intención de construir una red que sea cualitativamente mejor que la internet actual. GENI (*global environment for network innovations*) estará diseñada de tal manera que permita a los investigadores ensamblar un amplio conjunto de recursos distribuidos en una red virtual (Clark, 2006). Esta plataforma se divide en dos: 1) un substrato físico de red y 2) una estruc-

tura de gestión global. El substrato físico se constituirá a partir de bloques como una red dorsal óptica de punta, redes locales, redes de sensores, mallas *ad-hoc* inalámbricas, redes suburbanas con tecnologías 3G y WiMAX, así como equipos cognitivos de radio. En la estructura de gestión global se podrá agregar y manejar agregados de bloques de manera independiente. En la Universidad de Stanford se instrumenta el proyecto interdisciplinario *clean-slate design for the internet*, cuya premisa central es que la nueva internet debe ser diseñada partiendo de cero y con un horizonte de 15 años. Se busca que las ideas generadas sean creativas e innovadoras, sin ninguna dependencia con respecto a la arquitectura de la internet actual. Las áreas de investigación en las que se trabaja van desde la arquitectura de red, hasta la concepción de aplicaciones heterogéneas, pasando por la definición de políticas y modelos económicos que hagan de internet un recurso sustentable (McKeown y Girod, 2006).

3. Gobernanza y neutralidad de internet

La gobernanza de internet se refiere al control de las diferentes funciones que hacen posible el funcionamiento eficaz de la red. Es cierto que la red está compuesta por una multitud de redes y que no existe un nivel operativo global, pero hay áreas críticas que necesitan una estricta coordinación y vigilancia para su funcionamiento adecuado (Cukier, 2005). Entre ellas se incluye el ya mencionado sistema de nombres de dominio, por ejemplo www.cepal.org, que se traduce en una dirección IP en particular. Este es un sistema altamente distribuido con una fuerte jerarquización de responsabilidades. Sin embargo, las bases de datos que contienen información en la raíz de la jerarquía deben ser controladas por una entidad. La internet actual ha limitado a trece estos servidores, de los cuales diez se encuentran en Estados Unidos y los restantes en Amsterdam, Tokio y Estocolmo. Actualmente, los nombres de dominio están administrados por la *Internet Corporation for Assigned Names and Numbers* (ICANN), una organización privada sin fines de lucro con sede en California y con enlace al Departamento de Comercio de Estados Unidos. La determinación de estándares técnicos define los protocolos que permiten la operación de internet, y es competencia de la *Internet Engineering Task Force*, una comunidad internacional de diseñadores de red, operadores, vendedores e investigadores.

Esta estructura ha generado preocupación en la comunidad internacional. Muchos gobiernos sostienen que internet debe administrarse mediante un tratado multilateral. La Organización de las Naciones Unidas, sobre la base de las discusiones que se efectuaron durante la Cumbre Mundial de la Sociedad de Información, ha establecido el Foro de Gobernanza de Internet. El propósito de este foro es discutir las políticas públicas relacionadas con internet y hacer recomendaciones a la comunidad internacional. El trabajo y las funciones del foro son multilaterales –con la participación de todas las partes interesadas (gobiernos, sector privado, sociedad civil y organizaciones internacionales)– democráticos y transparentes. El foro tiene un término de cinco años, hasta 2011.

En internet no existen, hasta ahora, mecanismos de validación ni de control de acceso más allá del contrato que se establece entre el cliente y el proveedor de servi-

cios. Una vez que un paquete entra a la red, es tratado exactamente igual que cualquier otro independientemente de quién es el emisor, el receptor, o el tipo de información que transporta. Se considera que este “principio de neutralidad” ha sido fundamental para el éxito de internet. Sin embargo, muchos operadores plantean que éste no es el modelo más apropiado y quisieran dotar de cierta “inteligencia” a la red para filtrar u otorgar prioridades a los intercambios de sus clientes. De alguna manera, las grandes inversiones en IMS son incentivadas por esta tendencia.

Quienes defienden la idea de dar un trato diferenciado al tráfico, aseguran que de esta manera pueden dar prioridad a los contenidos enviados que sean sensibles al retardo, como VoIP y video, de los que no tienen tanta urgencia, como las descargas y transferencias de archivos. También se podrían adoptar más fácilmente políticas para resguardar la seguridad de la red. Finalmente, los operadores tendrían un esquema de mayor rentabilidad por usuario, y podrían utilizar las ganancias adicionales para actualizar su infraestructura, ofreciendo así mejores servicios. Quienes están a favor de que se mantenga el principio de neutralidad opinan que los operadores podrían utilizar indebidamente el control que adquirirían sobre la red. Por ejemplo, dicen, sería posible bloquear o discriminar el tráfico según acuerdos comerciales, lo que abre la posibilidad de acarrear fallas de mercado, como barreras de entrada o poderes monopolísticos (García, González y Alemán, 2006).

e. Servicios y contenidos digitales

El contenido de la infraestructura de red que se ha expuesto en las secciones anteriores tiene como finalidad dar el soporte para ofrecer una creciente variedad de servicios a los usuarios. El elemento habilitador es la interactividad de las redes. En una cantidad de servicios, es el usuario quien decide a qué acceder, cuándo, desde dónde y durante cuánto tiempo. Se trata de un modelo en que el usuario demanda contenidos (*pull*), combinado con el enfoque tradicional en el que los distribuidores seleccionan y presentan el contenido (*push*). Esta transformación requiere de cambios en los modelos de negocio y en las interrelaciones entre los participantes en la cadena de valor, lo cual no ha sido sencillo.

1. Contenidos digitales

Como se ha mencionado en las secciones anteriores, prácticamente toda la red de los operadores telefónicos ha sido digitalizada, y muchas de ellas se están transformando según el modelo NGN para incrementar la gama de servicios ofrecidos. Lo común en la actualidad es que el tráfico telefónico se transporte sobre el protocolo IP (VoIP), y un número creciente de operadores está ofreciendo este modelo directamente al usuario. Esto implica una sustitución de los servicios tradicionales de voz, y obliga a los operadores tradicionales a reestructurar sus modelos de negocios. Ante el interés de mantener sus ingresos, los operadores empiezan a incorporar nuevos servicios vinculados a la telefonía sobre IP, como video-telefonía, mensajería multimedia y servicios basados en la localización (gestión de presencia). En este contexto, y en parale-

lo a inversiones en IMS, algunos operadores se manifiestan a favor de abandonar los principios de neutralidad en la red, ya que un control sobre el tráfico de sus usuarios les permitirá ofrecer mejores servicios, con una calidad incluso superior que la obtenida en la red telefónica pública convencional.

Aparte de servicios de voz, un servicio que llena las redes digitales con contenido son los servicios en línea de distribución musical, primero con el muy polémico (y finalmente ilegal) sistema para compartir archivos Napster, y después con iTunes Music Store de Apple a través del formato MP3. La distribución de música en red permite ofrecer una gama de nuevos servicios, como incluir material suplementario (entrevistas, segmentos de video y otros) en la venta de música en línea, configurar canales de música personalizados según los gustos del usuario y ofrecer videos musicales bajo pedido para diversos tipos de dispositivos.

A nivel mundial, la difusión de emisiones de radio en formato digital es común en sistemas de televisión restringida (cable, satélite), pero en sustitución de la radio analógica (AM y FM) convencional ha tenido un éxito moderado a pesar de las ventajas ya mencionadas (Comisión Europea, 2006). Aparte de las grandes inversiones para transformar la infraestructura de emisión y recepción de radio, hay un creciente número de servicios que compiten con la radiodifusión, como la distribución de música MP3, los *podcasts*, e IPTV. Paulatinamente, las radiodifusoras amplían sus emisiones con servicios multimedia, interactivos y de programación personalizada, para competir con estos medios digitales. La interactividad y la combinación de mecanismos *pull* y *push* en la provisión de contenidos indican el fin del sistema de radio tradicional y la convergencia de estos servicios con las posibilidades digitales.

Al llevar la televisión digital a redes IP (IPTV), ya sea a través de internet o de las redes de los operadores de telecomunicaciones (posibilitando el *triple-play*), se crean servicios interactivos que incluyen la consulta, la contratación de programas, servicios y productos, votaciones y juegos en línea, hasta la creación de contenidos en los que se involucra activamente al espectador de forma que determine la secuencia de la obra (NM2, 2007). Los servicios de video bajo demanda (VoD) han recibido mucha atención en los medios. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que aún con enlaces de 2 Mb/s, descargar una película de dos horas con calidad de alta definición podría tardar 8 horas y media o más si el enlace se utiliza simultáneamente para otras funciones (Deloitte, 2007a), lo que exige una evolución de la gran mayoría de la red de acceso actual. En Japón y República de Corea, los servicios de televisión digital en dispositivos móviles han tenido una buena aceptación. De manera progresiva, el teléfono celular no debe verse únicamente como el equipo terminal para servicios de pequeños video-clips y música preparada, sino también como uno de los más grandes productores de contenidos, conforme el gran número de teléfonos móviles con capacidad de grabación de video que incorpora la dimensión de multimedia a la comunicación móvil de futuras generaciones de este sistema. Además, el celular podría servir como estación de relevo al recibir el contenido digital del operador para retransmitirlo a un dispositivo con una pantalla más grande en el hogar (Deloitte, 2007b).

Una gran parte del tráfico en las redes digitales es creado por servicios relacionados con juegos. La forma más sencilla es servirse de internet como canal de distribu-

ción para descargar nuevos juegos, actualizaciones y paquetes de expansión. Se puede bajar el juego completo o sólo una parte (típicamente la interfaz y un núcleo de elementos muy utilizados), mientras que el resto (los datos del momento) se despliegan en modalidad de *streaming* conforme se van necesitando. Un número cada vez mayor de usuarios participa en juegos masivos en línea mediante el uso de internet (*MMoG*, *massively multiplayer online game*). Entre los más populares en esta categoría se encuentra *world of warcraft* y el ambiente *second life*, que ha involucrado una cantidad de personas que se asemeja a la población de un país mediano (más de 8 millones a mediados de 2007) en una vida virtual secundaria. Con la llegada de consolas de juego con conectividad a internet, como la PS3 de Sony, la Xbox 360 de Microsoft, la Wii de Nintendo y las consolas portátiles PSP y DS, se han hecho populares los juegos interactivos en línea a través de interfaces especializadas. En algunos países asiáticos, las empresas de telefonía celular han encontrado un excelente mercado en la venta y distribución de juegos para dispositivos móviles, y una parte significativa de los ingresos de la industria europea del juego ya está ligada a dispositivos y redes móviles (Comisión Europea, 2006).

La interactividad de las redes digitales permite que los usuarios pasen de un papel pasivo de consulta de información, a uno muy activo de producción de contenidos. De manera informal, se llama *Web 2.0* al conjunto de tecnologías que funcionan en torno a la red y que facilitan la colaboración de los usuarios e incluyen herramientas como servicios *web* especializados, arquitecturas de *peering*, *weblogs (blogs)*, *wikis*, *podcasts*, *sindicación de contenidos* y *redes sociales*, entre otros. La participación de los usuarios como creadores de contenido se pone de manifiesto a través de la enorme popularidad que han tomado sitios como Flickr, YouTube y MySpace. Los wikis permiten la edición colaborativa de contenidos y su mejor exponente es, de lejos, la wikipedia.⁷⁰ Los *blogs* son diarios en línea, típicamente con contenidos multimedia, que permiten que cualquier usuario de internet se convierta en un editor. Se estima que hay unos 100 millones de *blogs* en la red en la actualidad,⁷¹ aunque, salvo algunas autoridades muy reconocidas, sus páginas son poco visitadas. Estas herramientas no se limitan a interacciones sociales informales, y hay empresas que están muy interesadas en estas tecnologías para facilitar la comunicación con sus clientes y socios, así como para facilitar el intercambio de información y la creación de ideas innovadoras al interior de la organización (McKinsey & Company, 2007).

2. Retos actuales

La Comisión Europea solicitó un estudio para identificar el impacto y evaluar problemas potenciales relacionados con la explotación de diversas formas de contenido digital a través de distintas plataformas de distribución (Comisión Europea, 2006). El

⁷⁰ <http://es.wikipedia.org> para la versión en español.

⁷¹ <http://www.technorati.com/about>

consumo de contenido digital está creciendo notablemente, por lo que se puede deducir que, en general, no hay grandes obstáculos para su disseminación. Sin embargo, sí se identificaron algunos obstáculos vinculados con aspectos tecnológicos, de gestión de derechos de autor, piratería, aspectos legales y regulatorios, y aspectos de negocios. A continuación se presentan brevemente algunas de sus conclusiones, que también son aplicables a regiones ajenas a la Unión Europea.

La primera de ellas es, por supuesto, la carencia de acceso a banda ancha, sobre todo del tipo bidireccional y de alta velocidad. Como se recordará, este es un problema complejo porque en tecnologías xDSL, la calidad del acceso depende de la distancia entre las instalaciones del usuario y el DSLAM, la cual puede ser muy variada aun dentro de una misma ciudad. En algunas zonas rurales el problema es mayor porque se carece de toda tecnología de banda ancha, las tecnologías inalámbricas sólo cubren algunos kilómetros de distancia, las opciones satelitales pueden ser muy costosas, y tecnologías alternas como HAPs aún son proyectos teóricos. Otro problema identificado es la falta de estándares en varios niveles. Por ejemplo, los productores de contenidos para dispositivos móviles se han visto en la necesidad de adaptarlos para los distintos tipos de fabricantes que hay en el mercado, lo que limita las economías de escala.

La gestión de derechos de autor es muy compleja porque la cadena de valor se ha transformado completamente, y esta situación ha obligado a empresas de distintos sectores, con intereses diversos, a establecer relaciones comerciales entre ellas. Dado que aún se están definiendo los modelos de negocios para la oferta de contenidos digitales, no está claro cómo hacer respetar los derechos de autor, distribuir las ganancias o salvar obstáculos derivados de las regulaciones locales. Un problema grave para la gestión de derechos de autor es la falta de normalización. Existen al menos tres tipos de tecnología para proteger la propiedad intelectual: CPS (*content protection system*), CAS (*conditional access system*) y DRM (*digital rights management*) y varias maneras de implementarlas, pero lamentablemente no son interoperables. La iniciativa *Coral Consortium* representa un compromiso por parte de las empresas para definir un marco global común, pero es infortunado que protagonistas del sector como Apple y Microsoft no hayan querido formar parte de este grupo. Además, estos sistemas han despertado una gran polémica porque se considera que pueden bloquear ideas creativas, afectar a usuarios legítimos, restringir los derechos que tienen sobre el material adquirido y obligar a la adquisición de dispositivos o *software* adicionales.

El marco regulatorio también debe revisarse para atender a los derechos del consumidor y proteger su integridad. Los dos elementos más apremiantes son la protección de grupos vulnerables y menores de edad contra la exposición de contenidos potencialmente dañinos o violentos, y la protección de la privacidad de los usuarios. Este último aspecto va cobrando mayor importancia a medida que las redes digitales potencian las relaciones interactivas entre usuarios y entre éstos y los mismos sistemas. La incapacidad del sector para mantener la seguridad y privacidad en el intercambio de información ha limitado el crecimiento y aceptación del comercio y gobierno electrónicos. A pesar del uso de certificados digitales, firmas electrónicas y

otros candados de seguridad, hay una sensación de escepticismo sobre quién es confiable o no (Mercuri, 2005). En un estudio realizado en Alemania en 2002, se reportó que el 75% de los encuestados temía que se produjera un mal uso de información al navegar por internet, el 60% evitaba ciertos portales y un 47% daba datos falsos (Berendt, Günther y Spiekermann, 2005). El marco regulatorio existente sólo resuelve de manera parcial este problema y, en general, su ámbito de validez es local, muchas veces insuficientes para atender las problemáticas de la aldea global. Más aún, con iniciativas como la “ley patriota” (*Patriot Act*) en Estados Unidos, se impulsa –de forma cuestionable– la posibilidad de sacrificar la privacidad de los individuos en aras de la seguridad (Neuman, 2004).

f. Conclusiones

A lo largo de este capítulo se han presentado algunos avances tecnológicos que conducen hacia la visión de las redes convergentes (i2010, 2006): “Cualquier usuario es capaz de conectarse en cualquier momento, desde cualquier lugar a través de cualquier dispositivo para acceder a contenidos de calidad y a servicios de comunicación en un ambiente seguro y accesible.” La evolución de las redes digitales es hacia la convergencia de contenidos digitales en una misma infraestructura, que funcione sobre la base de un protocolo común entre redes, el protocolo de “inter-net”, más conocido por sus siglas en inglés, IP.

La transición hacia redes convergentes supone mucho más que una migración técnica. Al transformar una serie de mercados verticales en el modelo convergente donde se separa por completo la infraestructura de los servicios ofrecidos, se afectan todos los sectores involucrados en la cadena de valor: creadores de contenido, operadores y distribuidores, fabricantes de equipo, y otros. Los modelos de negocio tradicionales con que se ofrecían servicios específicos, son insuficientes para satisfacer una creciente diversidad de opciones; empresas que tradicionalmente estaban completamente separadas, ahora se encuentran compitiendo entre sí o estableciendo alianzas estratégicas para posicionarse en el mercado.⁷² No se trata de una ruptura suave, ya que se crean distorsiones a lo largo de la cadena de valor, surge la necesidad de definir nuevos modelos de negocio y de conciliar intereses entre organizaciones y sectores que nunca se habían encontrado en el pasado.

La convergencia digital en los dispositivos es cada vez más visible y cambia la funcionalidad del uso de las redes, por esto algunos autores hablan de la convergencia funcional (Deloitte, 2007b). Si bien la computadora personal todavía es el principal dispositivo para acceder a internet, no es, desde luego, la única terminal con capacidades de conexión. Hace tiempo que los teléfonos celulares permiten acceder a servi-

⁷² Dos casos conocidos son el grupo *Sony*, que se ha diversificado desde la producción de equipos electrónicos hacia la producción de contenidos mediante las empresas *Sony Music* y *Sony Entertainment*, o al revés, la empresa Warner Brothers, que inicialmente se dedicaba a la producción de contenidos y después ha incursionado en las redes de cable con la compañía *Time Warner Cable*.

cios de redes digitales incluyendo, por supuesto, acceso a internet. Desde hace poco tiempo también se conectan a internet las consolas de videojuegos, algunos electrodomésticos, las llamadas *set-top boxes* que permiten visualizar programación digital en las televisiones analógicas convencionales, entre otros dispositivos. Al mismo tiempo, un teléfono celular se transforma en una terminal de radio y televisión, en un reproductor musical y hasta en una cámara de video para producir contenidos digitales, mientras que desde el decodificador de la televisión por cable es posible programar las emisiones bajo demanda, participar en concursos interactivos y solicitar información adicional de algún producto en telemarketing. Los dispositivos ya no se distinguen por el servicio que prestan sino por sus características asociadas: la resolución de la pantalla, la cantidad de memoria, las facilidades de movilidad y los modos de conexión, por ejemplo. Esta convergencia funcional puede ayudar a reducir la brecha digital porque diferentes dispositivos satisfacen distintos segmentos del mercado. Por tanto, junto con las enormes oportunidades que trae consigo la convergencia digital, surgen retos que deben ser encarados a la brevedad. Las autoridades afrontan el desafío de establecer un entorno que promueva la competencia, sin desincentivar la inversión y la creación de nuevos servicios.

13. PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

En estos dos capítulos se revisarán algunos de los últimos adelantos y los desafíos actuales de tecnologías artificiales de procesamiento de información, incluyendo el *hardware* en el que se basa y el *software* que le da funcionalidad. Se abordan algunos de los aspectos teóricos de la ciencia de la computación que han sido presentados en el primer capítulo, y se repasan los conceptos y la literatura relacionada.

a. Hardware de computación⁷³

Desde el siglo pasado se ha vinculado a la computación con la electrónica, debido a que los componentes físicos usados para implementarla son dispositivos electrónicos. Sin embargo, luego de muchos años de evolución y de miniaturización se está llegando a un límite impuesto por la física misma. Tal como se ha mostrado en la revisión de la trayectoria tecnológica de las máquinas computacionales, el desempeño de esta tecnología ha crecido exponencialmente durante los últimos 150 años. Actualmente se encuentra en el pleno desarrollo del paradigma del microprocesador, una solución construida sobre la base del silicio que ha llevado a un proceso de innovación continua sin precedentes. La miniaturización ha sido la característica clave de este proceso de “aprendizaje a escala” (*learning by scaling*), en el sentido de Sahal (1981). Si bien esta fase de innovación continua ha sido exitosa durante más de 40 años, esta manera de mejorar el desempeño llegará a su fin en los años venideros. Gordon Moore, quien en abril de 1965 cuantificó el ritmo de innovación de este ciclo, ha comentado que “en términos del tamaño, se puede ver que nos acercamos al tamaño de los átomos, que es una barrera fundamental, pero serán dos o más generaciones de microprocesadores antes de que llegemos hasta ese límite” (Dubash, 2005). Se estima que durante los próximos 15 años (alrededor de 2019) una capa en un microprocesa-

⁷³ Esta sección ha sido elaborada por Silvia Guardati del Departamento Académico de Computación del Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM) y Guillermo Morales-Luna del Departamento de Computación del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV-IPN).

dor necesitaría llegar a ser tan fina como un puñado de átomos, lo que detendría la ley de Moore en su sentido de innovación continua y acumulativa. ¿Sería este el final del crecimiento exponencial en el progreso tecnológico de la computación que ha estado vigente desde hace más de 150 años?

Como se ha explicado en la parte anterior, el paradigma del microprocesador no ha sido el primer paradigma tecnológico en responder a la interrogante de cómo se podría manipular información de forma inteligente por medio de herramientas tecnológicas. Anteriormente la humanidad había utilizado herramientas manuales con cuentas de madera, mecánicas, electromecánicas, tubos de vacío y transistores, lo que convierte al microprocesador en el sexto paradigma tecnológico de las computadoras. Considerando esta avenida de innovación de más largo plazo, es de esperar que una vez que el paradigma actual llegue a su fin, se inicie un nuevo paradigma tecnológico con el que se pueda sostener el ritmo habitual de crecimiento en el desempeño de la computación.

Si se reconoce la dinámica compleja entre *demand-pull* y *technology-push* presentada en la sección sobre la teoría del progreso técnico, nunca es posible predecir con exactitud cuál será la tecnología dominante que reemplazará al paradigma del momento. Sin tener la ambición de replicar los intentos de muchos expertos que aspiran a predecir el resultado de esta dinámica de caos, se puede identificar claramente a varios candidatos en el horizonte del desarrollo actual. Se han elaborado variantes de circuitos de tipo molecular o cuántico, y con estos dispositivos altamente plausibles es posible que la trayectoria tecnológica existente, y por ende también la ley de Moore, continúe estando vigente acaso un par de décadas más. A continuación se presentan algunas de estas variantes: los circuitos integrados tridimensionales de silicio, la computación óptica, la computación con ADN y la computación cuántica.

1. El horizonte de la computabilidad

En este segmento se presentan visiones panorámicas de la noción de computabilidad en el marco de los nuevos paradigmas de computación. Los circuitos integrados tridimensionales constituyen una alternativa para continuar con la miniaturización de procesadores hasta más allá del orden del nanómetro. En la parte sobre computación óptica se revisan someramente algunas de las alternativas de diseño. Se ilustra el cómputo molecular con ADN mediante el clásico problema de localizar ciclos hamiltonianos en gráficos, que es un problema de gran complejidad de tipo combinatorio, incomputable con las técnicas actuales. En cuanto a la computación cuántica, se presentan sus bases matemáticas y las ventajas que contiene para las comunicaciones y la criptografía, y se mencionan algunas de las alternativas actuales para implementarla.

La computación tradicional también es llamada *computación electrónica*, ya que son los *electrones* los encargados de representar la información que está siendo manipulada. En el sentido más básico se puede imaginar que la existencia de una corriente representa un “sí” (o un 1), y la inexistencia un “no” (o un 0). En la electrónica se utilizan los electrones por medio de interruptores, semiconductores y transistores

para llevar a cabo la computación como se la ha conocido hasta ahora. Al mismo tiempo, los transistores electrónicos se agrupan para formar los circuitos integrados. Gran parte de las mejoras logradas en el desempeño de las computadoras es producto de la miniaturización de los componentes electrónicos: los electrones necesitan viajar distancias muy cortas en tiempos reducidos. El resultado de esta tendencia es el desarrollo de una tecnología de integración a una escala muy grande (VLSI, *very large scale integration*), que permite crear dispositivos más pequeños y más complejos (Abdelyamen y otros, 2004). A pesar de los grandes avances logrados durante la última década, cada vez se acepta más como un hecho que con la tecnología actual no se podrán resolver los problemas de la computación que irán surgiendo. La velocidad de estos dispositivos está condicionada por las limitaciones físicas de los electrones, ya que no pueden ser más veloces que los electrones mismos,⁷⁴ y con los conocimientos que se tienen hasta el momento se está llegando al límite físico de los electrones. La velocidad de las computadoras que son producto de la miniaturización está limitada por la velocidad de los electrones y por el aumento de densidad de las interconexiones necesarias para unir las compuertas electrónicas sobre los *microchips*. Esto último ocasiona un problema adicional: el aumento del calor originado en los medios físicos, que daña los materiales y produce interferencias –errores en las señales– que afectan el desempeño de los sistemas en general.

Los circuitos integrados 3D son una opción para seguir adelante con el proceso de innovación continua, sin la necesidad de instrumentar grandes innovaciones de sistema o de material. Se apunta a lograr una mayor miniaturización, para ganar en densidad de almacenamiento y velocidad y ahorrar en consumo, además de aprovechar toda la experiencia acumulada en la tecnología del silicio y los conocimientos adquiridos en nuevos materiales.

La óptica ha sido aplicada a la informática durante algunos años, especialmente para la comunicación entre componentes de una computadora o entre computadoras, en el caso de las redes. En la computación óptica (o fotónica) se utilizan fotones de láser, lo que deriva en computadoras más rápidas (velocidad de la luz), más pequeñas y de menor costo. Los fotones se pueden manipular por medio de hologramas generados por computadora, hechos con plástico o vidrio a muy bajo precio. Bajo este supuesto, la computación óptica representa otra solución a los límites de la miniaturización. Por tanto, algunos científicos ven en la luz una respuesta a los problemas con los que se enfrenta la computación tradicional: el límite de velocidad es notablemente superior, se pueden transmitir simultáneamente cientos de señales de fotones usando diferentes frecuencias de color, asegura menos pérdida de información y ofrece mayor ancho de banda. Al reemplazar los electrones y los cables por los fotones, la fibra óptica, cristales y otros materiales de la misma naturaleza, se podrán construir computadoras considerablemente más veloces que las actuales.

Otra alternativa de solución a los problemas citados es la computación molecular, que funciona sobre la base de la biotecnología. Las investigaciones en este campo la

⁷⁴ Para mayor información, consúltese: <http://www.rmrc.org/photonics/photon1.htm>

señalan como una opción para alcanzar los objetivos de velocidad, espacio y consumo requeridos en el futuro cercano. Los resultados logrados hasta el momento permiten creer que ofrecerá grandes ventajas, tanto en la capacidad de almacenamiento como en el procesamiento de información. Se ha reportado la fabricación de algunos componentes moleculares, como por ejemplo compuertas lógicas, memorias, circuitos integrados y sensores.

La computación cuántica surge al combinar la mecánica cuántica y las ciencias computacionales, y con ella se pretende aprovechar algunas propiedades físicas del mundo subatómico, que no pueden ser tratadas por la mecánica clásica. Sin embargo, la mayor parte del material disponible hasta la fecha está desarrollado desde la perspectiva de la mecánica cuántica y mediante la aplicación de modelos matemáticos. Todavía es incipiente el material donde se analiza como una rama de estudio dentro de la informática, y con la utilización de términos y metodologías propias de ésta.

Cabe destacar que la computación molecular y la computación cuántica no son innovaciones continuas a las trayectorias tecnológicas ya existentes, sino que son innovaciones de sistema novedosas que se apoyan en la simbiosis de trayectorias tecnológicas provenientes de otras disciplinas. En estos casos se aprovecha el paralelismo inherente a ciertos procesos biológicos y a ciertos procesos físicos, y se señala un cambio más profundo en la trayectoria tecnológica de la computación.

2. Circuitos integrados tridimensionales de silicio

Los *circuitos integrados tridimensionales* –3DICs por su sigla en inglés: *three-dimensional (3D) integrated circuits (ICs)*– están formados por múltiples capas de dispositivos activos. La combinación de múltiples capas de dispositivos con una gran densidad de interconexión, permitirá mejorar el rendimiento –considerando tiempo y consumo de energía– de los circuitos integrados, así como aumentar su funcionalidad. El diseñador de circuitos digitales tiene en cuenta el *tiempo*, el *consumo de energía* y el *espacio* como parámetros importantes para lograr buenos productos (Das, Chandrakasan y Reif, 2004). Algunos consideran el tiempo como el elemento más prioritario, y establecen un máximo para su ciclo. Una vez que se logra optimizar este parámetro entonces se trata de cuidar el consumo de energía. Sin embargo, en algunos casos se procede en el orden opuesto, dando prioridad al consumo de la energía.

Un circuito integrado 3D está formado por varias capas de dispositivos activos, *apiladas* de tal manera que los transistores puedan estar cableados con otros transistores ubicados en la misma pastilla y también con transistores que se encuentren en otras pastillas adyacentes. Para fabricar 3D-ICs se requiere tecnología especial que permita superar las limitaciones de la construcción de circuitos integrados en dos dimensiones. Al colocar sobre el sustrato de silicio un transistor, éste se queda con un número limitado de vecinos próximos, con los cuales se conecta por medio de cables de extensión mínima. Cuando se *apilan* los transistores, se aumenta considerablemente el número de vecinos próximos que pueden ser interconectados entre sí. Por tanto, los circuitos fabricados en tres dimensiones tienen potencialmente más cables cortos y menos cables largos que uno fabricado en dos dimensiones. A este tipo de

tecnología –de empaquetado e integración– también se le denomina *tecnología de integración vertical*.

Existen varias tecnologías que permiten la integración en 3D. De acuerdo con el método de ensamblaje, puede ser integración a escala de cubo o integración a escala de pastilla. En el primer tipo las pastillas son procesadas y cortadas en cubos. Posteriormente esos cubos son alineados, apilados y adelgazados. Cada cubo puede ser probado antes de integrarse con los otros. En la integración a escala de pastilla, éstas se apilan primero y luego se cortan en cubos.

Beneficios de los circuitos integrados 3D

Topol (Topol y otros, 2006) señala algunos beneficios esperados con esta nueva tecnología. Destaca la mejora del desempeño debido a que cada transistor en un 3D-IC puede acceder a un mayor número de vecinos próximos, y por tanto cada bloque funcional de circuitos posee un mayor ancho de banda. Los aspectos que se verán más favorecidos son:

- *Reducción de ruido.* Este beneficio es consecuencia de que se tendrán interconexiones más cortas, y así se producirá una reducción de cargas eléctricas. Además, los cables más cortos tienen capacitancia más baja, cable a cable, y por tanto provocan menos ruido en las señales. Otra ventaja es que al usar cables más cortos se reduce el número de repetidores, lo cual también ocasiona menos ruido y mejor integridad en la señal.
- *Energía.* Considerando que los cables interconectados y los repetidores consumen gran parte de la energía, al reducir el número de cables la consecuencia favorable resulta obvia. Se estima que la eficiencia aumenta en un 15% aproximadamente, y se reduce el consumo de energía activa en más del 10%.
- *Densidad.* Con esta tecnología los dispositivos activos pueden ser apilados, y así se reduce el tamaño del espacio de impresión de un circuito. Además, al apilarlos se agrega una dimensión, con lo cual se mejora la densidad de empaquetamiento de los transistores, y se disminuye el volumen –y posiblemente el peso–. Cada componente del circuito se coloca sobre otro componente. Se estima un beneficio del 30% con respecto a los circuitos en 2D.
- *Desempeño.* La tecnología 3D permite colocar arreglos de memorias sobre o debajo de los circuitos logrando un mejor ancho de banda, y aumentando consecuentemente el desempeño en la comunicación entre el microprocesador y la memoria. Se puede determinar el desempeño del sistema como una función del número de capas de dispositivos usadas.
- *Funcionalidad.* La integración 3D permite la implementación de nuevas arquitecturas, que reflejan una mayor flexibilidad en el diseño. En principio se podrán combinar tecnologías distintas (analógica, óptica, y otras) para crear sistemas híbridos.

Avances y limitaciones de los circuitos integrados 3D

A lo largo de los últimos diez años, la compañía IBM⁷⁵ ha alcanzado importantes resultados, y se prevé que pronto serán aplicados a nivel de producción.⁷⁶ Representantes de la empresa han anunciado que, por medio de la utilización de nuevos materiales, se crearán circuitos integrados de metal *high-k* que serán más pequeños y más eficientes en el uso de la energía. Además, se presentó la nueva DRAM dedicada (eDRAM, por su sigla del inglés *embedded DRAM*), la cual permitirá mejorar el desempeño de sus procesadores en general y el de algunos en particular que requieren de un buen ancho de banda, como los de procesamiento gráfico y los de multimedia. Con esta memoria los nuevos circuitos dispondrán de hasta 48 MB de memoria caché, y por otra parte este tipo de memoria también representará un ahorro en espacio y en energía con respecto a la SRAM. El próximo procesador de IBM, *Power 6*, no empleará la eDRAM. Se espera que la misma comience a utilizarse en las siguientes generaciones de procesadores, especialmente en aquellos orientados al manejo de gráficos, multimedia, o redes, por citar algunas posibles aplicaciones. Por otra parte, esta empresa anunció la creación de circuitos tridimensionales por medio de *vías de silicio*, una técnica que permite que los componentes se apilen verticalmente en lugar de ser ubicados de manera horizontal; así se logran sistemas más pequeños, más veloces y que consumen menos energía. Estos circuitos también podrán ser aplicados en las comunicaciones inalámbricas y, por ejemplo, el circuito integrado de la supercomputadora *Blue Gene* se podrá convertir en un circuito integrado tridimensional.

Por otro lado, la firma Intel ha lanzado una nueva arquitectura de microprocesadores –de 65 nanómetros–, llamada *core 2 duo*.⁷⁷ Con esta arquitectura se reduce el costo, el consumo de energía y se aumenta el rendimiento de los procesadores. Además, la empresa prevé lanzar nuevos productos basados en una arquitectura de 45 nanómetros, la cual utiliza materiales *high-k*. Esto permitirá reducir el consumo de energía y hasta un 25% el tamaño de los procesadores y, por otra parte, aumentar hasta un 45% el rendimiento y hasta un 50% la memoria caché. Estos procesadores son ampliamente recomendados para el manejo de imágenes y sonido. Con su arquitectura *core 2 quad*⁷⁸ se pueden ejecutar en paralelo cuatro tareas distintas.

A pesar de los avances logrados a lo largo de los últimos años, aún quedan algunos retos por superar. Los distintos métodos de fabricación utilizados involucran la integración de cuatro áreas tecnológicas clave: adelgazamiento de las pastillas, alineación de dispositivos, fusión y patrones de contacto entre capas de dispositivos. Con respec-

⁷⁵ El artículo completo se puede consultar en: <http://www.ibm.laonthenews.com/clipview.php?idclip=8327>

⁷⁶ El artículo completo se puede consultar en: http://www.esemanal.com.mx/imprimir.php?id_sec=2&id_articulo=4952

⁷⁷ Para mayor información: <http://www.intel.com/products/processor/core2duo/>

⁷⁸ Para mayor información: <http://www.intel.com/products/processor/core2quad/>

to al *adelgazamiento*, se han elaborado pastillas de aproximadamente 20 micrómetros (20 μm) (Topol y otros, 2006) y de 50 μm en MDA.⁷⁹ En cuanto a la *alineación*, ésta representa una actividad de fundamental importancia, ya que para crear circuitos integrados de 3D de alta densidad se requiere que las capas estén alineadas –en altura– con una tolerancia de submicrones. Las herramientas actuales lo hacen con una tolerancia de aproximadamente 10 μm . Por su parte, la *fusión* queda determinada por la rugosidad y limpieza de las superficies involucradas en el proceso. Existen procedimientos que permiten limpiar y preparar los materiales para la fusión. Por último, el *contacto entre capas* puede clasificarse en tres categorías (Alam, Troxel y Thompson, 2003): a) Se conecta una capa metálica a un punto de contacto 3D en la parte superior de la pastilla, b) se conecta una capa metálica a un punto de contacto 3D en la parte inferior de la pastilla, o c) se conecta a través de toda la pastilla. Cada una de estas cuatro áreas sigue siendo el centro de muchas investigaciones. Otro aspecto que interesa resolver es el manejo del calor, un problema que se plantea como consecuencia del aumento de la densidad de los componentes.

3. Computación óptica

La óptica, ciencia dedicada al estudio de la luz, es utilizada desde hace tiempo en la computación. Algunas aplicaciones importantes de la luz en las TIC están ampliamente difundidas, como los cables de fibra óptica empleados para las telecomunicaciones de alta velocidad, o los lectores de discos ópticos usados en la mayoría de las computadoras. Es lógico que se busque la forma de usar la óptica para el procesamiento de datos, y poder incorporarla en diversos aparatos como computadoras, teléfonos móviles y automóviles, entre otros.

Definida de una manera muy simple, una computadora óptica es una computadora donde se usa la luz en lugar de electricidad para manipular, almacenar y transmitir información (Goswami, 2003): fibra óptica para conectar componentes electrónicos, y almacenamientos ópticos o la luz para realizar operaciones lógicas y aritméticas para procesar datos. Se trata de aprovechar las características de los fotones para lograr construir computadoras con un desempeño notablemente mejor que las actuales. Sin embargo, esta definición es demasiado general, ya que incluye cualquier participación de la luz, tanto en el procesamiento como en el almacenamiento y la transmisión de información.

Cualquier sistema en el que se usan electrones no puede ser más rápido que los electrones mismos. Las señales electrónicas pueden atravesar un transistor microscópico electrónico y realizar la tarea asignada en menos de un nanosegundo, y la luz viaja 30 cm en el mismo tiempo. Por tanto, muchos transistores ópticos podrían cumplir con tareas complejas en el mismo tiempo que un transistor electrónico requiere para cambiar de *encendido* a *apagado*. Los dispositivos fotónicos –interruptores ópticos,

⁷⁹ Para mayor información: <http://www.mdatechnology.net/techsearch.asp?articleid=460#sec6>

circuitos integrados– ofrecerán mayor velocidad que los electrones y formarán la base para el desarrollo de una nueva industria. Esta tecnología permitirá que siempre se trabaje a la velocidad de la luz, que es según Albert Einstein lo más rápido que existe. Además de la velocidad, tiene la ventaja de que no existe el problema potencial de cortocircuitos –que se presenta al usar la electricidad–, por lo que los rayos de luz pueden ser redireccionados mediante algún dispositivo sin ningún problema.

La óptica no lineal se ocupa de la propiedad de ciertos materiales que disminuyen la luz a diferentes velocidades al mismo tiempo. Como consecuencia de esta característica se presentan dos problemas: el primero de ellos es que la luz disminuye, y el otro es que para conseguir que la luz responda en dicho material de manera similar a ejecutar alguna tarea computacional, se requiere que el láser sea muy potente. Pero esto ocasiona que el componente se queme cuando se aplica la luz para conseguir que se realice la actividad. Por tanto, el esfuerzo se ha concentrado en producir materiales no lineales que puedan hacer el cambio rápidamente y que no requieran mucha potencia.

Para evitar la degradación de la velocidad como consecuencia de la interacción con medios eléctricos, los transistores ópticos deberán funcionar sobre la base de principios físicos que no alteren esta característica. El único retardo aceptado es el tiempo requerido para que la energía atraviese algún medio como un holograma. Este tipo de transistores debe ser compatible con el vacío, lo cual permite que pueda operar donde la luz se mueve al límite de su velocidad. Hasta el momento se han construido algunos componentes lógicos ópticos, que serán la base para fabricar una computadora óptica. El transistor óptico se fundamenta en tres principios:

- Dadas las características ópticas de un rayo de láser, las leyes de la física óptica pueden ser usadas para calcular un holograma que transformará la energía en otra configuración óptica permitida físicamente, y que será usada para interconectar información por medio de rayos de luz en circuitos integrados de manera holográfica. Así, los hologramas creados por computadora pueden implementar computación digital óptica a gran escala.
- Los rayos láser controlados holográficamente pueden ser configurados para producir procesos de transistores fotónicos.
- La computación óptica provee la base teórica para organizar múltiples rayos de luz en computadoras digitales ópticas que son capaces de imitar las funciones electrónicas a la velocidad de la luz.

Avances y límites de la computación óptica

Desde los orígenes de la computación se reconoció la ventaja de la luz como medio para transportar información. Sin embargo, no se pudo encontrar el mecanismo que permitiera computar con la luz y este papel lo desempeñó la electricidad, por medio de los electrones. Actualmente, la mayor dificultad está en obtener materiales con los que se pueda implementar la computación óptica de una manera comercialmente competitiva.

En este último tiempo ha habido algunos avances que proporcionan un nuevo impulso a este campo de estudio; entre ellos se encuentra el invento del láser. Las señales ópticas comunes son energía electromagnética difícil de controlar y por tanto susceptible al ruido. Por su parte, el láser produce señales de ondas mucho más limpias y continuas, lo cual le permite transportar información compleja. Otro campo es la aparición del holograma generado por computadora. Los hologramas pueden ser calculados usando la física de la óptica. Se ingresa una señal óptica conocida y se crea el holograma necesario para dirigirla y manipularla en cualquiera de las formas que las leyes de la física permiten, incluyendo dirigir una luz de láser a través del holograma resultante. El concepto de los hologramas permite la manipulación de numerosas señales ópticas, es decir, que hagan lo que se desea que hagan, como por ejemplo mostrar una imagen bonita o computar, que es la idea detrás de las computadoras ópticas. Los hologramas permiten la interconexión de componentes, y los hologramas de baja funcionalidad pueden ser fabricados a partir de materiales de bajo costo, como el plástico, el vidrio o el aluminio; por ejemplo, los hologramas de las tarjetas de crédito.

En los años ochenta la investigación en el área de la computación óptica tuvo un gran auge. Sin embargo, los científicos se encontraron con el inconveniente de que los materiales usados no cubrían las expectativas de desempeño, tamaño y costo. Actualmente, con los avances alcanzados en estos últimos años, se puede pensar en un renacimiento de esta tecnología. Los avances que parecen impactar directamente en el resurgimiento de esta área son, entre otros, la fabricación de materiales como los polímeros orgánicos, el hecho de que el procesamiento paralelo de la información se hace de manera más fácil y menos costosa, y que el progreso en los dispositivos ópticos de almacenamiento permite diseñar medios eficaces, compactos y de gran capacidad.

Durante la última década, la investigación enfocada a la computación óptica se ha concentrado principalmente en el desarrollo de *túneles ópticos* con diversas capacidades, procesadores ópticos para transferencia asíncrona, arquitecturas para redes neuronales ópticas y procesadores ópticos análogos de gran precisión, capaces de computar grandes cantidades de información en paralelo (Goswami, 2003).

Son muchos los proyectos que se están instrumentando en distintos centros de investigación. Por ejemplo, científicos de la empresa Intel y de la Universidad de California en Santa Bárbara⁸⁰ presentaron una nueva tecnología híbrida, de silicio y óptica, que permite aumentar la velocidad de las comunicaciones internas de una computadora. El surgimiento de circuitos ópticos representa un avance en el desarrollo de semiconductores, en los cuales se utiliza la tecnología óptica para la comunicación entre circuitos y otros componentes de una computadora. La principal ventaja al reemplazar los cables de cobre por fotones es que se aumenta el ancho de banda, lo que produciría circuitos de mayor velocidad. Además, también solucionaría

⁸⁰ Para mayor información consúltese: <http://www.intel.com/research/platform/sp/> y <http://www.ucsb.edu/>

los problemas relacionados con la comunicación eléctrica: la dispersión y el consumo de energía. Esta tecnología híbrida permitirá la producción masiva de circuitos fotónicos. Cientos de éstos serán ubicados en un solo circuito integrado, y se logrará lo que los investigadores de Intel llaman una nueva era de aplicaciones de la computación de alto rendimiento. Con esta tecnología se apunta a beneficiar la computación con los avances alcanzados en las comunicaciones ópticas. Por otro lado, investigadores del MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts) han integrado circuitos ópticos sobre un circuito de silicio, lo que agrega a la electrónica la potencia y la velocidad de la luz. Por ahora, es un logro a nivel de laboratorio. Un inconveniente con el que los investigadores se habían enfrentando es que los dispositivos microfotónicos son sensibles a la polarización de la luz, es decir, la luz que se desplaza a través de las fibras ópticas puede ser arbitrariamente polarizada vertical u horizontalmente, lo que ocasionaba que los circuitos ópticos no pudieran funcionar adecuadamente. Los investigadores del MIT solucionaron este problema, y posibilitaron así el avance de la computación óptica. Además, aprovechan la madurez de la industria del silicio, para producir circuitos fotónicos sobre circuitos integrados compuestos de ese material.

Aplicaciones de la fotónica

Las aplicaciones más importantes de la óptica a la computación han sido para conectar algunas partes de una computadora o en dispositivos que tienen alguna función de este tipo, como son el reconocimiento de patrones ópticos, ampliación de huellas digitales, procesamiento de imágenes ópticas, sólo por citar algunos. Además, los discos ópticos CD-ROM y los diodos de láser son usados en los sistemas de cómputo modernos. Por ahora las computadoras ópticas puras son sólo una promesa. En general, se utilizan los conceptos vinculados a este campo para extender las aplicaciones exitosas del almacenamiento óptico y de la comunicación óptica.

El almacenamiento de esta naturaleza es implementado por medio de discos ópticos o por sistemas de almacenamiento holográfico, ambos con gran capacidad y densidad. Uno de los principales beneficios que se desprenden de esta tecnología es la gran capacidad y rapidez para la lectura de la información; además, tiene mayor resistencia a la radiación. Todas estas características la presentan como una excelente alternativa para aplicaciones que requieren de importantes volúmenes de datos, como por ejemplo en el área del esparcimiento y videojuegos o para uso de las grandes compañías (mayor volumen, menor tiempo de acceso). Actualmente se está trabajando en elaborar nuevos medios para almacenar datos ópticos, así como para mejorar el desempeño y la capacidad de los discos ópticos ya existentes. La empresa Call/Recall Inc.⁸¹ desarrolló una tecnología para trabajar tanto con discos ópticos como con memorias holográficas. La tecnología propuesta proveerá discos con una

⁸¹ Para mayor información consúltese: <http://www.call-recall.com/ie/home.htm>

capacidad muy grande –de 100 a 500 GB– y un acceso de 1 a 10 Gb/seg., usando un polímero de bajo costo y larga duración.

La velocidad de la luz tiene especial importancia para la comunicación. Con la tecnología actual, la velocidad de la red está limitada a alrededor de 50 *gigabytes* por segundo. Se cree que para satisfacer la demanda futura será necesaria una capacidad de un *terabyte* –un billón de *bytes*–. Todo parece indicar que la computación óptica podrá ofrecer una alternativa de solución a este problema, ya que algunas empresas se han dedicado al desarrollo de equipo óptico para redes, entre las que se destacan Chiaro Networks⁸² y Cisco.⁸³ La primera lanzó un protocolo de internet óptico, capaz de transportar casi 8.000 millones de paquetes por segundo. Le llaman el primer enrutador óptico de IP del mundo, y se supone que tiene 1.000 veces más capacidad que uno convencional. Por su parte, Cisco, en su plataforma ONS15600 –producto construido sobre la denominada *Cisco complete optical multi-service edge and transport* (COMET)– combina la tecnología electrónica con la óptica, y logra una disminución notable en el tamaño de sus equipos así como un ahorro de energía de más del 50%. El usuario de internet gozará de un enorme ancho de banda que permitirá descargar rápidamente los archivos, seguir videoconferencias y ver películas en tiempo real. Además, en el futuro se podrá contar con televisión holográfica en tres dimensiones. En el marco de las comunicaciones, el uso más importante de esta tecnología, hasta el momento, ha sido en el área de la *telefonía*. Muchas compañías telefónicas han invertido en migrar de cables de cobre a fibra óptica, debido a que la luz representa un medio más veloz y potente que la electricidad para transportar información. La razón es que los fotones –la unidad básica de la luz– van más rápido y tienen un ancho de banda superior a los electrones. La tendencia actual está enfocada en el área de las comunicaciones, aprovechando las características de la óptica: los rayos de luz pueden viajar próximos unos a otros, incluso interceptarse sin llegar a originar señales no deseadas, y el riesgo de introducir ruido –errores– en la información se reduce debido a que la luz es inmune a la interferencia electromagnética. Otra ventaja importante es que la luz viaja muy rápido y tiene un gran ancho de banda espacial y gran densidad física de canal lo que la convierte en un medio excelente para transportar información.

Otra aplicación de la óptica en el área de las TIC es la identificación biométrica. La empresa A4Vision⁸⁴ se dedica a la elaboración de soluciones biométricas, destinadas especialmente al control de acceso de personal, de cruce de fronteras, programas de pasaportes y visas electrónicos y, en general, en todas aquellas situaciones donde una identificación eficiente sea requerida. Sus productos combinan tecnología óptica, reconstrucción de rostros y algoritmos de reconocimiento.

⁸² Para mayor información consúltese: <http://www.chiaro.com/index.jsp>

⁸³ Para mayor información consúltese: <http://www.cisco.com/en/US/products/hw/optical/index.html>

⁸⁴ Para mayor información consúltese: <http://www.A4Vision.com>

4. Computación molecular con ADN⁸⁵

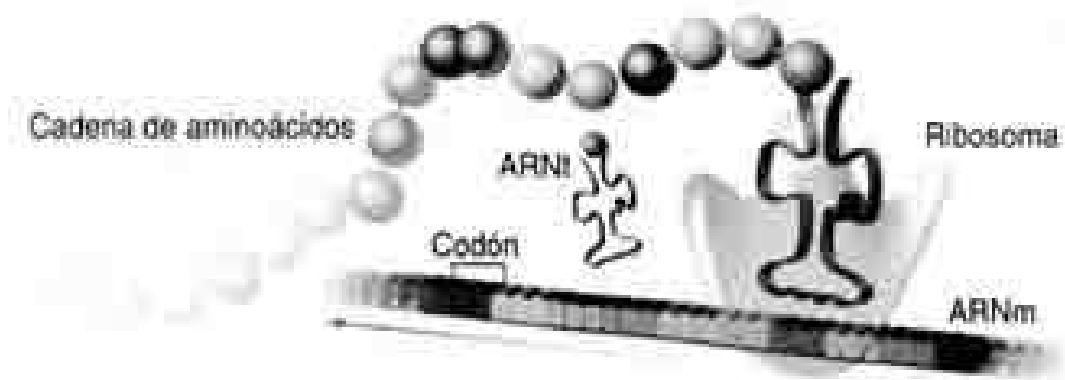
La computación molecular o computación con ADN es una forma de computación en la que se utiliza el ADN y conceptos de bioquímica y biología molecular en lugar de las tecnologías tradicionales basadas en silicio. La computación molecular, en cierto sentido, es sinónimo de computación paralela, ya que aprovecha las ventajas de múltiples moléculas diferentes de ADN para explorar distintas alternativas al mismo tiempo.

Una máquina de Turing biológica

La información en términos biológicos y químicos puede ser manipulada según los mismos criterios de la máquina de Turing (*véase* la primera parte del libro). Como se ha mencionado, la máquina de Turing es un dispositivo ideal dotado de una unidad de control con capacidad de lectura y escritura que procesa la cinta –símbolo a símbolo–, y sigue las instrucciones de las reglas de transición, que tienen en cuenta el estado interno de la propia unidad de control. En la figura se presenta una máquina biológica que está inspirada en una máquina de Turing. Los ribosomas traducen la información codificada en el ARNm a las secuencias de aminoácidos que formarán las proteínas. El alfabeto simbólico del ARNm consta de codones y cada uno de ellos corresponde a un aminoácido específico. A medida que el ribosoma procesa la cadena del ARNm –codón a codón–, las moléculas colaboradoras –los ARNt– proporcionan el aminoácido correspondiente. El ARNt confirma la concordancia del codón y luego libera al aminoácido que se une a la cadena en crecimiento (gráfico 13.1).

Gráfico 13.1

LA MÁQUINA DE TURING BIOLÓGICA



⁸⁵ Esta sección fue elaborada por Ángel Kuri, Osvaldo Cairó y Silvia Guardati.

En computación molecular, el ADN representa el *software* y las enzimas el *hardware*. La forma en que las moléculas sufren reacciones químicas al interactuar entre ellas, permite operaciones simples que se pueden realizar como un bioproducto de las reacciones, y los científicos pueden examinar lo que se lleva a cabo en los dispositivos, al controlar la composición de las moléculas de ADN. En este sentido, en la computación molecular se aprovecha la facultad de las moléculas de reaccionar simultáneamente dentro de un mismo tubo de ensayo, tratando una cantidad de datos muy grande al mismo tiempo. Se estima que una computadora molecular podría ejecutar aproximadamente 10^{14} millones de instrucciones por segundo, es decir, 10^{10} veces más rápido que una computadora actual construida sobre la base del silicio. Otra ventaja importante radica en la cantidad de información que puede almacenar. Se considera que en un centímetro cúbico o un gramo de *ADN seco* se podría almacenar la información equivalente a un trillón⁸⁶ de CD, aproximadamente 1 *bit* por nanómetro cúbico, nm^3 . Una solución acuosa de ADN –con algunas sales y otros compuestos– podría contener aproximadamente de 10^7 a 10^8 *terabytes*. Además, se podrían realizar búsquedas paralelas masivas sobre este volumen de información (Hong y otros, 2004).

Es interesante señalar, por otra parte, que aunque las TIC digitales están basadas todas en el mismo código básico para representar información, el *bit*, se utilizan una multiplicidad de programas y lenguajes para efectuar diferentes funciones, que responden a preferencias tecnológicas, operativas e idiosincrásicas. En contraste, con excepción de algunos virus, todos los seres vivos responden al mismo código genético –lenguaje–. Esto se puede interpretar como una analogía en la cual los programas que regulan el comportamiento celular de cada ser –sea animal o vegetal, unicelular o pluricelular, eucarionte o procarionte– está escrito en el mismo lenguaje. Esta observación es el hecho científico más convincente de que todos los seres vivos provienen de un antepasado común.

Aplicaciones de la computación molecular

Si bien el funcionamiento de una máquina universal de computación sobre la base de conceptos biológicos todavía parece ser lejano, ya existen algunas aplicaciones concretas. El campo de la computación molecular fue especialmente desarrollado por Leonard Adleman (1998), de la Universidad del Sur de California, cuando resolvió el problema de la *ruta hamiltoniana* con un grafo de 7 nodos. Este es básicamente el problema del agente viajero (también conocido como problema del viajante de comercio), que tiene como objetivo encontrar una ruta que, comenzando y terminando en una ciudad concreta, pase una sola vez por cada una de las ciudades enlistadas y minimice la distancia recorrida por el viajante. Es un ejemplo con el que se demues-

⁸⁶ Para mayor información consúltese: <http://www.washingtontimes.com/national/20040428-105738-9804r.htm>

tran y analizan las interrogantes que subyacen a algunos tipos de problemas matemáticos que *a priori* parecen tener una solución relativamente fácil, y en la práctica resultan ser más complejos.⁸⁷ Adleman (1994) fue el primer científico que logró implementar una tecnología computacional con ideas biológicas, utilizó la estructura de moléculas de ADN para almacenar la información inicial del problema y estudió las moléculas resultantes de las reacciones químicas para obtener la solución. La idea básica consiste en producir al azar un juego de caminos entre los vértices de los determinados nodos y hacer uso de condiciones y reacciones de células para eliminar cualquier camino que no satisfaga las condiciones del problema, entre ellas el comienzo y final en los puntos indicados, la inclusión de todos los puntos y la no duplicidad de puntos conectados. Para ejecutar la computación, Adleman agregó agua, la ligasa, sal y otros ingredientes necesarios para obtener las adecuadas condiciones dentro de la célula y, en cosa de un segundo, tenía en su mano la respuesta al *problema de la ruta hamiltoniana*, gracias a los procesos biológicos establecidos.

A partir de los experimentos de Adleman se han hecho varias pruebas, según las cuales se puede inferir que en el futuro será posible construir una máquina de Turing biológica. Si comparamos una hipotética computadora molecular con una supercomputadora actual podremos observar que el tamaño, la velocidad de cálculo, la cantidad de información que puede almacenar y la energía necesaria, son sustancialmente mejores. Además, se tendría la perspectiva de lograr sistemas autorreproducibles –lo vivo se puede autorreproducir–, un concepto que las computadoras electrónicas no son capaces de implementar.

En los últimos años, las investigaciones han avanzado en forma notoria. Ogihara y Ray (1997) mostraron la manera de simular circuitos *booleanos* con ADN, Oliver (1996) demostró cómo se pueden utilizar los cálculos con el ADN para obtener el producto de matrices *booleanas* o de matrices que contienen números reales positivos, y Guarnieri, Fliss y Bancroft (1996) propusieron una nueva forma de sumar dos números binarios. Por otro lado, las ventajas del paralelismo masivo de la computación molecular sobre los circuitos electrónicos tradicionales parecen innegables. En este caso específico se podría pensar en cálculos en los que cada estado del procesador se encuentre representado por una *hebra de ADN*. En un litro de solución de ADN se podrían almacenar 10^{18} procesadores (Hong y otros, 2004). En 2001 un equipo de investigadores de Israel (Benenson y otros, 2001), anunció que había construido una computadora compuesta solamente por moléculas de ADN, capaz de realizar miles de millones de operaciones por segundo con una exactitud de 99,8%, que además ocupa una pequeña cantidad de energía, y que es un millón de veces menor que una computadora personal. La máquina es tan pequeña que un tubo de ensayo podría contener

⁸⁷ La *ruta hamiltoniana* es un problema de tipo NP completo. Con un gráfico constituido por líneas que conectan a un conjunto de puntos, se dice que hay una *ruta hamiltoniana* desde el punto A hasta el punto B, si existe un único conjunto de líneas del gráfico que une el punto A con el punto B pasando una sola vez por cada uno de los diferentes puntos del conjunto. El problema consiste en decidir si para un gráfico dado existe o no una *ruta hamiltoniana*.

15.000 billones de tales dispositivos; el modelo para la computadora ADN es un autó-mata que responde preguntas de tipo binario: *sí* o *no*. Pares de moléculas sobre un filamento del ADN representan los datos, mientras el *hardware* para leer, copiar y manipular el código se representa por medio de dos enzimas. Al mezclar la combinación en un tubo de ensayo, se produce el resultado. La máquina puede efectuar aproximadamente 330 billones de operaciones por segundo, que la hace más de 100.000 veces más rápida que la más veloz de las computadoras personales.

5. Computación cuántica

Se ha afirmado que la computadora cuántica comparada con la computadora común que conocemos hoy es como la energía nuclear comparada con el fuego (Johnson, 2002). Este potencial proviene del mundo cuántico, que tiene características diferentes que el mundo como lo conocemos normalmente. La teoría cuántica se dedica a analizar partículas subatómicas. Como se ha explicado en la sección sobre nanotecnología, el nivel molecular, que es el nivel donde se juntan diferentes átomos para crear estructuras muy pequeñas con características especiales, ya parece ser un mundo donde es difícil trabajar con exactitud. El mundo cuántico va un paso más allá y entra al nivel subatómico, donde las predicciones divergen radicalmente de la llamada física clásica. El concepto de la partícula subatómica atiende al tamaño en el cual comienzan a notarse efectos como la imposibilidad de conocer con exactitud, es decir se trabaja en términos probabilísticos, no determinísticos. La teoría cuántica implica el reconocimiento de que atributos mutuamente excluyentes pueden convivir en sistemas atómicos, es decir, en el nivel esencial de las cosas es posible que coexistan valores que se podrían considerar opuestos, como verdadero y falso, prendido y apagado, arriba y abajo, estar y no estar, entre otros. La disyunción aparece cuando se realizan mediciones u observaciones. En este momento, la incertidumbre cuántica se convierte en información.

En la computación tradicional el elemento básico de información es el *bit*, el cual puede tomar dos valores o estados: cero o uno, prendido o apagado, verdadero o falso. Es por eso que se dice que las computadoras funcionan con el sistema binario, y como se ha expuesto en la primera parte del libro, la idea del *bit* es el paradigma científico básico de nuestra época. Por otro lado, en la computación cuántica la unidad básica es el *qubit*, el cual puede estar en una superposición de valores 0 y 1. En otras palabras, sigue vigente el argumento de Shannon que el código binario es lo más eficiente, pero el *qubit* permite que no sea necesario decidirse entre ambas opciones, o por lo menos no de inmediato. Además, al concatenar a los *qubits* se forman arreglos, llamados *quregistros*, de crecimiento exponencial. Esto dota al cómputo cuántico de un paralelismo inherente que permite acelerar notoriamente los procesos.

El extraño mundo del qubit y del entrelazamiento

A continuación se presentan algunos de los conceptos básicos relacionados con la computación cuántica, necesarios para la comprensión de este tema.

Qubit (QUANTUM BIT). Es la unidad mínima de información cuántica. Por su importancia, se presenta con más detalle más adelante.

Entrelazamiento. Cuando dos partículas permanecen relacionadas entre sí formando un subsistema que no puede describirse separadamente. Por su importancia, se presenta con más detalle más adelante.

Superposición. Hace referencia a un estado cuántico, el cual describe la situación en la que una partícula puede adoptar más de un estado a la vez. En general, es natural pensar que ciertos entes están encendidos o apagados, vivos o muertos, arriba o abajo. Por tanto resulta difícil imaginar que pudieran estar en ambos estados al mismo tiempo. A pesar de que la superposición se considera común en la naturaleza, no es fácil relacionarla con eventos de la vida diaria, ya que parece contradecir nuestro sentido común. La metáfora más controvertida de la superposición es el famoso gato de Schrödinger, que al mismo tiempo está vivo y muerto.⁸⁸ Un ejemplo menos polémico para ilustrar este concepto es el de un rayo de luz que se proyecta hacia una superficie sobre la cual el rayo se separa en partes. Por tanto, la luz se refleja hacia arriba de la superficie y a su vez se transmite a través de la misma. Se dice que está en dos estados posibles, se refleja y se transmite simultáneamente.

Decoherencia. Se le llama así al fenómeno que ocasiona que al interactuar con un *qubit* éste adopte uno de sus posibles valores, perdiendo el resto y de esta manera perdiendo también las ventajas implícitas de la superposición cuántica de la cual gozaba hasta el momento de la interacción. A este fenómeno se le conoce como error. Por otra parte, se ha demostrado que es posible compensar estos errores mediante códigos cuánticos correctores de errores. Estos códigos detectan y corrigen los errores mediante técnicas cuánticas.

Interferencia. El movimiento de las partículas subatómicas se define en términos probabilísticos, no determinísticos. Como consecuencia, ya no se representa por medio de una trayectoria definida, como por ejemplo una recta o una curva, sino que se hace por medio de una onda. La onda tiene la propiedad de propagarse, y por tanto puede expresar el hecho de que la partícula tal vez esté en distintos lugares al mismo tiempo, ya que proporciona información sobre las diferentes probabilidades de posición de la partícula. Otra consecuencia de esta representación en forma de onda, es que las ondas interfieren con otras ondas y consigo mismas. Esto último produce un efecto de cancelación o reforzamiento, dependiendo de la posición del encuentro. Si se pensara en términos de música, una computadora cuántica que realiza el cómputo

⁸⁸ Es un experimento imaginario de Erwin Schrödinger y supone un sistema formado por una caja cerrada y opaca que contiene un gato, una botella de gas venenoso, una partícula radiactiva con un 50% de probabilidades de desintegrarse y un dispositivo tal que, si la partícula se desintegra, se rompe la botella y el gato muere. Al depender todo el sistema del estado final de un único átomo que actúa según la mecánica cuántica, tanto la partícula como el gato forman parte de un sistema sometido a las leyes de la mecánica cuántica. Mientras la caja esté cerrada, el gato se encuentra vivo y muerto a la vez, tal como el estado de superposición lo señala. En el momento en que se abre la caja, la sola acción de observar al gato modifica su estado, haciendo que pase a estar solamente vivo, o solamente muerto.

tradicional produce una secuencia de ondas análogas al sonido generado por la ejecución de un instrumento. En cambio, si realiza el cómputo cuántico –paralelismo basado en la superposición– el efecto será equivalente al producido por una orquesta –varias ondas desplazándose al mismo tiempo e interfiriendo entre sí.

Principio de incertidumbre de Heisenberg. Este principio establece que hay un límite en la precisión de cualquier observación que se realice en el mundo subatómico e incluso en el atómico, debido a que es imposible hacer una observación objetiva sin afectar el estado del objeto observado. Por tanto, no se pueden determinar simultáneamente y con precisión ciertos pares de variables físicas de un objeto, como por ejemplo la posición y la velocidad. Es decir, se podría observar la posición de una partícula, pero se perdería información sobre su velocidad. Según la física cuántica esta limitación no se podrá superar, ya que depende, no de los medios de observación, sino de la observación misma que constituye una interacción directa con el objeto estudiado.

Reversible. Hace referencia a la propiedad de que una vez aplicada una operación sobre ciertos datos y obtenido el resultado, es posible a partir de éste regresar a los datos. Las compuertas lógicas clásicas NO son reversibles, ya que si se aplica, por ejemplo, un AND sobre dos *bits*, se obtiene como resultado un *bit* del cual ya no se puede regresar a los datos iniciales. Como una compuerta AND requiere que ambos *bits* sean un 1 para producir un 1, las combinaciones 0-0, 1-0, 0-1 producen un 0. Teniendo un 0 como resultado, no es posible determinar cuál de las tres posibilidades era la combinación inicial.

Quregistro. Es la concatenación de varios *qubits*, ya que puede tomar un número exponencial de estados. Un queregistro –también llamado *n-qubit* registro– puede contener una superposición de 2^n posibles valores. Se puede evaluar una función sobre este queregistro, y extraer una superposición de todos los resultados. El problema surge cuando se realiza la medición: sólo un simple y aleatorio valor queda disponible.

Medición. Se le llama así al proceso de medir –leer– el valor de un *qubit*. Esta operación, como ya se ha mencionado, implica alterar el estado del *qubit* medido. Esta es otra de las grandes diferencias con un *bit* clásico. En queregistros entrelazados, la medición de un *qubit* afecta las mediciones de los *qubits* restantes.

Compuertas cuánticas. Las compuertas cuánticas –también llamadas qucompuertas– son los mecanismos para manipular los queregistros.

Paralelismo cuántico. Se refiere a la evaluación simultánea de una función para muchos valores a través de la aplicación de una compuerta cuántica. El problema para el cual aún no se ha encontrado solución es la extracción de los resultados por medio de las mediciones. Como ya se mencionó, al medir se obtiene de manera aleatoria un solo valor de toda la superposición de valores que se generó.

El *qubit* es la unidad mínima de información cuántica. En otras palabras, un *qubit* es un concepto que se define como una superposición de los valores cero y uno. En el momento en que un *qubit* se mide, será cero o uno. Sin embargo, antes de la medición el *qubit* puede tener un valor mitad cero y mitad uno, o cualquier combinación de estos dos posibles valores, por ejemplo el 65% uno y el 35% cero. Por tanto, la

medición puede verse como una tarea creativa, ya que una vez que se lleva a cabo se obtiene –crea– un *bit* de información. Dicho proceso también puede verse como un proceso destructivo, porque la medición y obtención de un valor automáticamente implica perder los otros posibles valores.

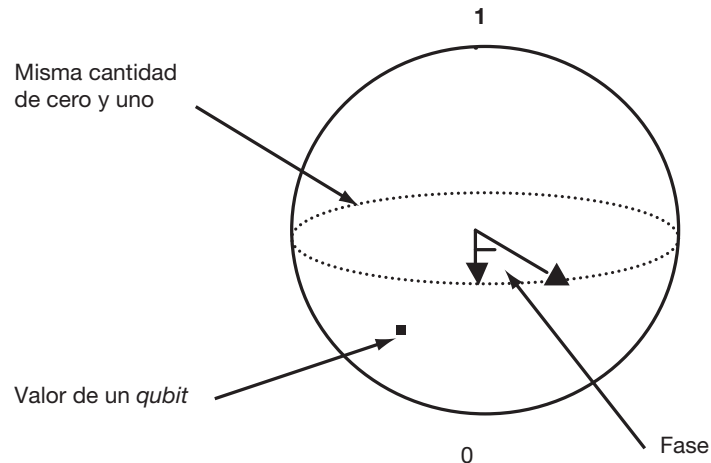
En Von Baeyer (2004) se encuentra una explicación muy ilustrativa de lo que representa un *qubit*. Sugiere ver el *qubit* como el resultado de la unión de un *bit* con un lanzamiento de moneda, el cual hereda características de ambos padres aunque siendo él mismo muy diferente de ellos. Por un lado comparte con sus padres que son una idea o concepto y no un objeto. Con respecto al *bit* difiere en que éste puede tomar el valor cero o uno, mientras que el *qubit* se define como una superposición de cero y uno. Cuando su valor es medido, éste será cero o uno, de manera aleatoria, lo mismo que cuando se lanza una moneda se obtiene cara o cruz. Sin embargo, antes de la medición el *qubit* existe en un estado de equilibrio entre cero y uno –el 50% cero y el 50% uno– o en cualquier estado intermedio, por ejemplo el 60% cero y el 40% uno. Esto es semejante a lo que ocurre con la moneda una vez que es lanzada al aire: puede estar en posición vertical –el 50% cara y el 50% cruz– o más inclinada hacia alguno de sus lados. De ahí que se diga que la medición es un proceso creativo, ya que antes de efectuarse existe información potencial y una vez que se lleva a cabo se crea un *bit* de información definido.

Von Baeyer también sugiere considerar un conjunto de pelotas –llamémosles qu-pelotas–, de las cuales hay algunas blancas y otras de color negro, guardadas dentro de un cajón. Si se analiza desde un punto de vista *convencional*, cada pelota tiene un color definido asignado desde antes de ser guardada en el cajón. La indeterminación del color se debe sólo a que no se pueden observar mientras están dentro del cajón. Al sacar una pelota se puede medir u observar su color, blanco o negro. En esta misma situación, analizada desde un punto de vista *cuántico*, cada pelota o qu-pelota no tendrá un color definido inicialmente, es decir, desde antes de ser guardada en el cajón. Pero, al sacar una qu-pelota y realizar una medición –u observación– se obtendrá un color para ella.

Una manera bastante realista de describir la creación y la medición de *qubits* es por medio de un separador de rayos. El separador se coloca horizontalmente, de manera paralela al piso. Si se proyecta una luz de láser sobre él, oblicuamente desde arriba, se verá que parte del rayo de luz es transmitido a través del material hacia abajo, y otra parte es reflejada hacia arriba. Posteriormente se baja la intensidad de la luz a nivel de fotones, y se acuerda que cada fotón es capaz de transportar un *bit* de información. Se establece como convención que un fotón que va hacia arriba es 1 y un fotón que va hacia abajo es 0. De esta manera se ha construido un generador de *qubits*. Si se lanza sobre el separador un fotón que lleva como información un 1, se obtendrán dos señales, una arriba y una abajo. Esto es consecuencia directa de que en realidad lo que se ha creado es un *qubit* con capacidad para superponer los dos posibles valores: cero y uno.

En el gráfico 13.2 se presenta una representación geométrica de un *qubit*. En los extremos se ubican los dos posibles valores: cero y uno. Las posiciones intermedias entre dichos extremos indican la superposición de estos dos valores, y pasar de un

Gráfico 13.2
REPRESENTACIÓN GEOMÉTRICA
DE UN QUBIT EN FORMA ESQUEMÁTICA



extremo a otro equivale a una negación. En el centro se encuentra la misma cantidad de cero y uno –el 50% de cada uno de los valores–. Si se toma esta representación, se tienen dos parámetros de la mecánica cuántica para un *qubit*: la latitud y la longitud; la primera de ellas muestra la proporción de cero a uno en la superposición. La longitud indica la fase, que se define como el grado en el cual sus ondas están difiriendo. Así, en el meridiano 0, las ondas están perfectamente sincronizadas. En los extremos, la longitud no tiene importancia, ya que allí no hay superposición sino que encontramos alguno de los dos estados posibles del *qubit*. En cualquier otra parte de la esfera, ambos parámetros –latitud y longitud– son los que definen un *qubit*.

Una limitante importante de los *qubit* es que no pueden copiarse. De acuerdo con el teorema de *no-clonación* formulado por Wootters y Zurek (1982), se establece que un estado cuántico desconocido no puede copiarse sin provocar su destrucción. Si se conocen la latitud y la longitud de un *qubit*, entonces se pueden construir varias copias. De otra forma es imposible.

Aún existen problemas prácticos que impiden usar los *qubits* como memorias. Uno de los principales es el manejo del ruido –errores– durante el proceso de preparación del *qubit*. Por otro lado, también resulta problemática la lectura de un *qubit*, ya que no puede ser leído directamente, sino que se determina por medio de la probabilidad de encontrar el valor cero o uno. Y para calcular la probabilidad es conveniente contar con mediciones previas del *qubit*.

El entrelazamiento es el fenómeno de la física cuántica que ocurre cuando dos partículas permanecen relacionadas entre sí y forman un subsistema que no puede describirse de forma separada. Si una de las partículas sufre un cambio de estado, la otra se ve afectada automáticamente de manera instantánea, sea cual fuere la distancia que las separe. Se dice que dos partículas están entrelazadas (*entangled*, en inglés, o *verschränkt*, en alemán) si se da la superposición de sus posibles estados.

Para aclarar un poco más este concepto se puede retomar el caso de las qu-pelotas presentado en la sección dedicada a los *qubits*. Si se toman dos qu-pelotas y por medio de ciertas operaciones se las entrelaza, sus colores seguirán siendo desconocidos aunque ellas sean las mismas. Según la manera en que fueron entrelazadas, al realizar mediciones sobre una de ellas se obtendrá cierto resultado sobre la otra. Una alternativa para llevar a cabo el entrelazamiento es que al medir y extraer un valor para la primera, la otra obtenga el mismo valor. En este caso ambas serían negras o blancas. Otro efecto que se podría lograr con el entrelazamiento es que obtengan valores opuestos, de tal forma que si la primer qu-pelota tiene color negro, la otra sea blanca. Uno podría imaginarse dos qu-pelotas con valores opuestos, blanco y negro, y que una de las dos es lanzada al otro lado del Universo y la otra se queda en la Tierra, sin haber identificado cuál de las dos es negra. En el momento en que uno vea el color de la qu-pelota en la Tierra, sabría con exactitud el color de la otra qu-pelota, aunque estuviese a millones de años luz y hubiera sido imposible comunicar cuál es su color. No obstante, no sería necesario comunicar este dato, ya que la información sobre el color de ambas está entrelazada y no requiere ser transmitida en el sentido tradicional. La diferencia con los *qubits* es que ambas pelotas “reciben” su color en el momento en el que uno “mira” el color de una de las dos.

Es importante señalar que dos partículas entrelazadas no se comunican entre sí, sino que es la correlación entre sus mediciones lo que las caracteriza. Considérese un electrón, que es un pequeño imán descrito por una flecha imaginaria llamada *espín*. Si se elige una dirección cualquiera y se decide realizar una medición de la dirección del *espín* se verá que éste apunta hacia arriba o hacia abajo, pero nunca hacia alguna posición intermedia. Por otro lado, si se producen dos electrones en una reacción atómica se puede lograr que la correspondiente pareja de *espines* ocupen posiciones opuestas. Se desconoce acerca de la dirección de los *espines* de cada electrón. Si uno de los *espines* es medido, se obtendrá un valor definido –arriba o abajo– y por tanto el otro electrón –independientemente de dónde esté– tendrá el valor opuesto cuando se mida sobre la misma dirección. Este es un buen ejemplo de dos partículas entrelazadas, en las cuales se da la superposición: el número 1 está arriba mientras el número 2 está abajo y el número 1 está abajo mientras el número 2 está arriba. Por ahora no resulta fácil preparar partículas entrelazadas ni medir precisamente las direcciones de sus *espines*. El reto sigue siendo que la tecnología alcance a la teoría.

Con respecto a la *teleportación*, ésta hace referencia a comunicar el estado físico de un objeto a otro objeto ubicado a la distancia. Si se aprovechan las características cuánticas, se transmiten *qubits* sin enviar *qubits*. Por un lado, existe la restricción de que los *qubits* no pueden ser copiados, pero al mismo tiempo el entrelazamiento de *qubits* permite la transmisión de información –estados– sin que se necesite la operación de envío. El emisor y el receptor cuentan con un par de *qubits entrelazados*, que se podrían llamar q_1 y q_2 . Posteriormente estos *qubits* se separan. El *qubit* q_1 se queda en el emisor, junto al *qubit* (Q) que será transmitido, y q_2 en el receptor. Se lee el estado de los *qubits* q_1 y Q , el cual ha cambiado debido a la interacción entre los mismos. La información leída es enviada al receptor, donde es utilizada junto al *qubit* q_2 y de esta forma se obtiene una réplica exacta de Q . La teleportación cuántica no

implica transmitir energía o materia; lo que se está transmitiendo es un estado cuántico de una partícula, que es muy útil para la computación y la comunicación cuántica.

La computadora cuántica, su implementación y los algoritmos

Una computadora cuántica es un dispositivo mediante el cual se hace uso de la teoría cuántica para llevar a cabo el procesamiento de información. En este sentido, en una computadora cuántica se aprovechan las ventajas de las características de los *qubits*, la superposición y el entrelazamiento de los mismos. Actualmente el área de la computación cuántica sigue siendo un área de investigación y estudio, y todavía no se han podido desarrollar computadoras cuánticas para efectos comerciales. Sin embargo, cuentan con la atención de muchos centros de investigación, tanto gubernamentales como privados, lo que subraya la magnitud de las promesas y expectativas, tal como el potencial de terminar las investigaciones exitosamente. Por ahora existe el consenso de que una computadora cuántica deberá estar formada por un conjunto de *qubits*, sobre los cuales se podrán aplicar las siguientes operaciones: cada *qubit* es preparado en un estado inicial; cada *qubit* se puede medir; una o varias puertas cuánticas universales pueden ser aplicadas sobre cualquier subconjunto de *qubits*; y los *qubits* no se alteran sino sólo a través de alguna de las formas previamente anunciadas. En esta etapa, aún experimental, se han realizado las operaciones previamente listadas sobre números pequeños de *qubits*, pero todavía no sobre números más grandes.

En una computadora tradicional se trabaja de manera serial, es decir, las operaciones se llevan a cabo una tras otra. Cuando la tarea –procesamiento de grandes volúmenes de información o tareas muy complejas– lo justifica se utilizan varios procesadores para que todos ellos ejecuten parte de la función, y se logra lo que se conoce como computación paralela. Se presume que estas computadoras tendrán la capacidad para trabajar con lo que David Deutsch llama paralelismo masivo.

Si se sigue comparando con una computadora tradicional, se sabe que una de estas máquinas maneja *bits* de información cuyos valores –cero o uno– se almacenan en una celda de memoria. En el caso de una computadora cuántica, cada celda contendrá un *qubit* que tiene una superposición de cero y uno. En una computadora clásica, por tanto, si se toman cuatro celdas se tendrá una cadena de cuatro *bits* que pueden representar 16 variables.⁸⁹ Por otro lado, si se contara con una computadora cuántica se tendría en una sola ocurrencia las 16 (2^4) posibles cadenas de cuatro *bits*, sin la necesidad de determinarlo. Como ya se mencionó, al realizar una medición se obtendrá uno de los 16 valores pero se perderán los otros. Sin embargo, es posible evitar las mediciones y, si se aplica la idea de que un *qubit* es representable por medio de una onda, se puede llegar a una nueva configuración al aplicar algunas operaciones. De esta manera se podrán realizar cálculos con las 16 cadenas en el mismo tiempo que

⁸⁹ 0000, 0001, 0010, 0100, 1000, 0011, 0110, 1100, 0101, 1010, 1001, 1110, 1101, 1011, 0111, 1111

una computadora tradicional lo hará sobre una sola cadena de cuatro *bits*. Finalmente, es importante mencionar que aunque se puede evitar la medición, en realidad sólo se evita temporalmente. Luego de efectuado el procesamiento, se requiere leer uno de los resultados obtenidos, ya no se permite inferir con cuál entrada se produjo el resultado y se pierden los restantes valores. Cuanto mayor sea el número de *qubits* involucrados, mayor será la ventaja del paralelismo masivo. En esta etapa, aún experimental, se han realizado las operaciones previamente listadas sobre números pequeños de *qubits*, pero todavía no sobre números más grandes.

En Von Baeyer (2004) se presenta una analogía que ayuda a entender el concepto de paralelismo masivo. Se tienen 1.024 monedas que pesan diez gramos cada una, excepto una que es falsa y pesa nueve gramos. Se sabe, además, que las monedas están mezcladas y que pesar cada una de ellas consume un minuto. Si se desea determinar cuál es la falsa, ¿cuánto tiempo llevará? a) Una persona con una balanza –análogo a la computación tradicional y usando procesamiento serial– tomará alguna cantidad acotada por 1.023 minutos (alrededor de 17 horas), dependiendo de la suerte que se tenga al sacar la moneda que se pesará. b) Diez personas con una balanza cada una –análogo a la computación tradicional y usando procesamiento paralelo– tomará la décima parte del tiempo antes planteado. Es decir, se ocuparán casi dos horas de diez personas si no se cuenta con suerte al sacar la moneda que se pesará. c) Una persona con una sola balanza divide el grupo de monedas en dos subgrupos, pesa y determina el grupo que contiene a la moneda buscada –ya que dicho grupo pesa un gramo menos que el otro–. El proceso continúa separando a las monedas del grupo más liviano en dos grupos y volviendo a pesar. Se repite esto último hasta que, luego de diez divisiones, se tiene una moneda y se sabe así cuál es la falsa. Sólo se requirió pesar diez veces: diez minutos. Este último caso es el que ofrece la mejor analogía con el paralelismo masivo. Por un lado, se está utilizando la estrategia recomendada en el juego de las veinte preguntas de Shannon, que se había presentado en la primera parte del libro: se divide el espacio de incertidumbre por la mitad, que es la manera más eficaz de extraer información. En este caso, se extrae la información en grupos y aunque no se sabe cuál es la moneda falsa, se sabe en cuál grupo está. El secreto está en no manipular las monedas individualmente, sino en grupo. Algo similar ocurre con el cómputo cuántico: no se trabaja con unidades de información individuales sino con muchas a la vez.

Un algoritmo cuántico es la ejecución de una serie de compuertas cuánticas –operadores o transformaciones– aplicadas a *qubits* o quregistros, de manera de alcanzar ciertos estados finales en los cuales se realizan mediciones para determinar si se llegó a un estado-solución. De una manera muy simple, Oemer (2002) define una transformación unitaria y la posterior medición del estado. Shor (2005) afirma que los algoritmos cuánticos son difíciles de desarrollar debido, entre otras cosas, a que la experiencia acumulada en los años de historia de la computación no es directamente aplicable a la computación cuántica. Por tanto, aunque puedan existir numerosos algoritmos por descubrir, no resulta una tarea simple.

En la actualidad aún no es posible implementar la computación cuántica según lo definido en los modelos matemáticos y de acuerdo con la teoría de la física cuántica.

Todavía se trabaja a nivel de laboratorio, aunque ya existen prototipos muy interesantes que sustentan las ideas que se han promovido sobre esta área. Por otra parte, los científicos coinciden en que cualquier sistema físico que realice la *computación cuántica* ha de cumplir con los criterios llamados *de DiVincenzo*:

- Tener caracterizada la noción de *qubit* y poder ensamblar varios de ellos.
- Contar con un conjunto de compuertas cuánticas primitivas que permitan realizar cualquier algoritmo.
- Poder inicializar una lista de *qubits* en estados puros determinados.
- Poder ejecutar la operación de toma de mediciones.
- Que los tiempos de coherencia excedan los de aplicación de las compuertas cuánticas primitivas.

A pesar de los avances que se han alcanzado quedan aún algunos aspectos importantes que resolver, por ejemplo cómo corregir los errores que se producen al manipular los *qubits*, cómo medir el entrelazado entre múltiples *qubits*, cómo transferir información –tanto clásica como cuántica– a través de cables y a través de las conexiones entre los *qubits*. Por tanto, para la construcción de una computadora cuántica se deberá resolver previamente la manera en la que se almacenará la información de entrada, el entrelazado y posterior manejo de los *qubits* y finalmente, la lectura o medición de resultados.

Se han propuesto varios modelos físicos para la implementación de computadoras cuánticas (Hughes y Heinrichs, 2004):

Resonancia nuclear magnética (nuclear magnetic resonance, NMR). Un conjunto de moléculas en una solución líquida en el que siete *espines* en cada molécula hacen al mismo tiempo de siete *qubits* (Lieven y otros, 2001). Con esto, se puede factorizar a 15 como el producto de 3 por 5. Sin embargo, no podría extenderse el modelo a más de 10 *qubits*.

Cavidad electrodinámica cuántica (cavity quantum electro-dynamics, Cavity QED). Consiste de la interacción entre un *qubit* material –realizado como un átomo atrapado o un sistema puntual, *dot*, semiconductor– y un campo cuantizado –propriadamente un fotón– de un resonador de microondas. Para conseguir una dinámica coherente se utiliza una cavidad para ampliar la frecuencia de Rabi entre el átomo y el campo. Este modelo es apropiado para convertir estados de *qubits* materiales y *qubits* de fotones y es particularmente apto para protocolos de 2-quiregistros (Duan, Kuzmich y Kimble, 2003); también ha sido utilizado en protocolos de comunicación, y en este aspecto se destaca el grupo del profesor Cirac (Briegel y otros, 1999) del Instituto Max Planck.

Trampas de iones (ion traps). Se utilizan arreglos de trampas de iones interconectados por fotones, o por iones que hacen de cabezales lectores para transmitir la información entre arreglos, o por iones que transitan entre los arreglos. Los *qubits* dados como iones se mueven en diferentes zonas de trampas sin decoherencia en tiempos adecuados para la aplicación de compuertas cuánticas (Monroe, 2002). Las

trampas pueden realizarse como sistemas micro-electro-mecánicos o mediante técnicas de nanofabricación.

Átomos neutros (neutral atoms). Un sistema de átomos neutros atrapados puede ser apropiado para el cómputo cuántico, debido a una estructura atómica simple al nivel cuántico, a que se mantienen aislados del medio ambiente y a su habilidad para atrapar e interactuar con una gran cantidad de átomos idénticos. Una computadora cuántica podría ser vista como un reloj atómico consistente de varios átomos interactuando de manera controlada. En la actualidad se tienen niveles de control para producir condensados de Bose-Einstein⁹⁰ (Anglin y Ketterle, 2002) y gases degenerados de Fermi,⁹¹ con lo cual se ha previsto acoplar átomos.

Técnicas ópticas. Estas se comenzaron a utilizar en protocolos criptográficos y para realizar el fenómeno de entrelazamiento (Peters, Wei y Kwiat, 2004) y han sido muy importantes en la investigación del procesamiento cuántico de la información. Aunque se ha demostrado su eficacia en protocolos de comunicación, se afronta el problema de escalabilidad: hay limitaciones para formar ensambles de *qubits* fotónicos, aunque acaso no sean esenciales (Lukin e Imamoglu, 2000). La detección de efectos no-lineales entre fotones abre una posibilidad de escalar el modelo.

Superconductividad. Aquí los *qubits* son circuitos de superconductividad operando a temperaturas de miligrados Kelvin (Maklin, Schön y Shnirman, 2001). Por ser de tipo eléctrico pueden interactuar con transistores consistentes de un solo electrón. Los *qubits* se inicializan al enfriar los sistemas a su estado base, y mediante pulsos electromagnéticos de radiofrecuencia se aplican las operaciones cuánticas. Se pueden alcanzar velocidades del orden de 700 GHz con muy poca disipación de potencia. Las mediciones respecto a diversas bases pueden ser realizadas mediante magnetómetros de interferencia cuántica de superconductividad.

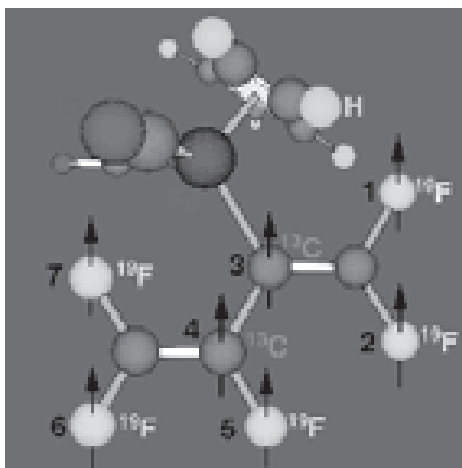
Técnicas de estado sólido. En este caso (Loss y DiVincenzo, 1998), los *qubits* son sistemas de dos niveles altamente coherentes correspondientes a estados de *espines* de electrones localizados o de núcleos atómicos. Las compuertas quedan dadas por interacciones recíprocas entre los *espines*. Las transiciones excitónicas ortogonalmente polarizadas pueden realizar la noción de una pareja de *qubits*; y el emparejamiento, que conlleva la formación bi-excitónica, puede utilizarse para realizar la

⁹⁰ Condensado de Bose-Einstein es un estado de agregación de la materia que se da en ciertos materiales a muy altas o bajas temperaturas. La propiedad que lo caracteriza es que una cantidad macroscópica de las partículas del material pasan al nivel de mínima energía, denominado estado fundamental. El condensado es una *propiedad cuántica* que no tiene análogo clásico.

⁹¹ Un gas degenerado de Fermi es una colección macroscópica de átomos tal que las partículas que lo componen se encuentran arregladas de menor a mayor valor en la escala de energía. Así, la partícula en el estado de más baja energía posee energía igual a cero, y la partícula que se encuentra en el estado más alto tiene una energía denominada energía de Fermi. El hecho de que los fermiones se distribuyan de esta forma, es una consecuencia de la imposibilidad de dos fermiones de ocupar el mismo estado cuántico. Se puede obtener más información en: <http://www.revista.unam.mx/vol.6/num7/art67/art67-2.htm>

Recuadro 13.1

1925. Heisenberg (1925), Schrödinger (1926) y Dirac (1926) formularon la mecánica cuántica, la cual contempla la teoría cuántica desarrollada por Planck, Einstein y Bohr.
1961. Rolf Landauer plantea que la computación es física y analiza la generación de calor.
1973. Charles Bennett estudia la noción de *reversibilidad* de las computaciones.
1981. Richard Feynman plantea que los sistemas físicos, incluidos los de nivel cuántico pueden ser simulados de manera exacta por computadoras cuánticas.
1982. Peter Benioff presenta modelos lógicos de *máquinas de Turing cuánticas*.
1984. Charles Bennett y Gilles Brassard introducen las nociones básicas de criptografía cuántica.
1985. David Deutsch reinterpreta la llamada tesis de *Church-Turing*.
- 1993: Bennett, Brassard, Crepeau, Josza, Peres, Wootters descubren la noción de *teleportación*.
1994. Peter Shor publica su algoritmo cuántico para factorizar enteros.
1995. Lov Grover propone un algoritmo cuántico para realizar búsquedas en espacios de datos no ordenados.
2001. El algoritmo de Shor fue probado en una computadora cuántica de *7-qubits*, (véase el gráfico). Científicos de IBM desarrollaron la computadora cuántica más grande hasta el momento, en la que se implementa el algoritmo propuesto por Shor para factorizar números enteros.



Molécula de 7-qubits⁹²

(Continúa)

⁹² Imagen tomada de: http://domino.research.ibm.com/comm/pr.nsf/pages/news.20011219_quantum.html

Recuadro 13.1 (Continuación)

2004. Se expone el funcionamiento de la primera computadora cuántica de estado puro NMR en la Universidad de Oxford y en la Universidad de York.
2005. Algunos de los principales avances reportados en este año: 1) Se anunció la creación del primer *qubyte*. 2) Se logró transferir información cuántica entre memorias cuánticas –desde átomos a fotones y de regreso. 3) Se construyó por primera vez un *chip* escalable de computadora para *qubits* atómicos.
2006. Algunos de los principales avances reportados en este año: 1) En la firma HP se estudia el uso de los fotones –en lugar de los electrones– para el procesamiento de información. 2) Zoller, en Austria, descubre cómo usar las moléculas de *cryogenic polar* para hacer memorias cuánticas estables. 3) Investigadores de la Universidad de Cambridge y de la empresa Toshiba proponen un nuevo dispositivo para producir fotones entrelazados. 4) Científicos de la Universidad de Ohio descubrieron cómo lograr que la luz viaje entre puntos cuánticos, lo cual ayudaría a la comunicación entre computadoras cuánticas ópticas. 5) Se presentó la primera computadora cuántica basada en 12 *qubits*. 6) En la Universidad de Arkansas desarrollan moléculas de puntos cuánticos. 7) En la Universidad de Copenhague, en Dinamarca, realizan teleportación cuántica entre fotones y átomos.
2007. La empresa D-Wave Systems Inc.⁹³ presenta su computadora cuántica de 16-*qubits*. Ésta utiliza una tecnología que funciona sobre la base de la electrónica de superconductores, que son aluminio y niobio, ambos metales a temperatura ambiente pero a temperaturas cercanas al cero absoluto, sus electrones se aparean en los llamados *pares de Cooper*, los cuales poseen el mismo estado cuántico y por las propiedades de superconductividad el efecto se amplifica. De esta manera se han construido coprocesadores que simulan el cómputo cuántico. Además, en este año se patenta un radar cuántico.

noción de entrelazamiento. Una limitación de este enfoque son los cortos tiempos de decoherencia.

Aplicaciones de la computación cuántica

La *computación cuántica* tiene sus orígenes en campos muy especializados de la física teórica pero en un futuro tendrá un impacto profundo en la vida cotidiana. En la actualidad se encuentra aún en una etapa de intenso desarrollo, desde experimentos que permiten observar los fenómenos hasta técnicas para controlar dichos fenó-

⁹³ Para mayor información se puede visitar: <http://www.dwavesys.com/>

menos. Diversos grupos de distintos países están involucrados en la implementación física de modelos de computación cuántica, entre los que se cuentan el Laboratorio Nacional de Los Álamos, el Instituto Tecnológico de Massachusetts y el Tecnológico de California en Estados Unidos, la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN, por su sigla en francés: Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), el grupo de centros de investigación participantes en el Consejo Europeo de Asesoría para la Iniciativa de Nanoelectrónica (ENIAC, por su sigla en inglés: European Nanoelectronics Initiative Advisory Council) en Europa, la empresa NEC y otros institutos universitarios en Japón, entre muchos otros. Para esto se busca desarrollar tanto arquitecturas óptimas como algoritmos en este paradigma para diversos problemas. Entre las tecnologías de implementación están las trampas de iones, la electrodinámica cuántica de cavidades (QED) y la resonancia magnética nuclear (NMR), aunque aún las limitaciones son muy grandes. Es de esperar que las primeras computadoras cuánticas de uso generalizado sean muy distintas de sus modelos actuales.

Considerando las características ya enunciadas de la computación cuántica es importante concentrarse en aquellos problemas cuya solución no está determinada por la entrada de datos. Es decir, los que por su naturaleza requieran de una búsqueda para llegar a su solución encuentran en la computación cuántica un gran potencial. Mientras que los problemas que tengan una solución específica, alcanzable a través de una serie de pasos, no representan un reto para este nuevo campo. Es más, se supone que en esos casos difícilmente la computación cuántica representará una ventaja sobre la tradicional. El algoritmo de Shor –para factorizar grandes números– es un claro ejemplo de un problema real, fácilmente solucionable con la computación cuántica. La factorización de grandes números es muy utilizada en el área de criptografía y para rompimiento de códigos, lo cual la convierte de gran utilidad para las áreas: financiera, agencias de inteligencia, militar, comercio electrónico, sólo por citar las más importantes.

Las principales aplicaciones de la computación cuántica previstas están en las áreas de *criptografía* –seguridad de la información, preservación de la privacidad y de la integridad de los mensajes; *bases de datos* –localización de registros en información poco estructurada; recolección de información de tipo militar o *de inteligencia*; *simulación de fenómenos cuánticos* –estudio de diversos modelos de la física de partículas; *cómputo masivo* –de interés en ciencias como física, astronomía, química, meteorología, oceanografía, ciencias forenses– y *simulación de procesos dinámicos* –desde explosiones de diversos tipos hasta hidrodinámica de diversos fluidos. Naturalmente, en la administración y los negocios sus potencialidades son enormes en cuanto a la localización de información y sus posibilidades de pronóstico mediante la corrida de procesos. Acaso el desarrollo de cúmulos de computadoras se basará también en procesadores de tipo cuántico. La ingeniería a escalas atómicas y la interferometría atómica basada en la dualidad onda-partícula de la luz constituyen también áreas de aplicación potencial de esta disciplina. De todas las áreas listadas, se destacan especialmente dos:

Algoritmos de búsqueda en conjuntos desordenados de datos. La búsqueda en bases de datos desordenadas actualmente implica un algoritmo del orden de $N/2$ –siendo el N el número de registros. Con un computador cuántico se podría realizar con un número de intentos igual a la raíz cuadrada de N . Por ejemplo, para $N=10.000.000$, actualmente se harían, en promedio, 5.000.000 de operaciones, mientras que con una computadora cuántica se realizarían 3.162 aproximadamente.

Criptografía cuántica. El objetivo de la criptografía es proporcionar medios seguros de comunicación de información. Los algoritmos de clave pública son muy usados en la actualidad: se tiene una llave pública para encriptar la información y una privada para desencriptarla. Sin embargo, estos algoritmos consumen mucho procesamiento y no son absolutamente seguros. La *criptografía de clave pública* ha facilitado el establecimiento de claves privadas propias de cada transacción y se usa en el protocolo de comunicaciones SSL, *secure socket layer*, de internet. En esta criptografía se utilizan problemas matemáticos de gran dificultad, como el de factorización de enteros, es decir, encontrar los factores primos de un número entero muy grande –del orden de 1.024 o 2.048 *bits* cuando se le escribe en binario–, o del cálculo de logaritmos discretos; en otras palabras, en un grupo cíclico, dado un generador, para un elemento cualquiera se trata de encontrar la mínima potencia del generador que lo representa. Las dificultades son aparentemente esenciales, por lo que los nuevos dispositivos de cálculo acelerarían en factores constantes el desempeño de los algoritmos para resolver estos problemas. El cómputo cuántico –por la posibilidad de involucrar en un solo paso de cómputo una cantidad exponencial de información– podría disminuir la complejidad implícita en la solución de estos algoritmos. Por ejemplo, el mejor algoritmo para resolver el problema de factorización tiene una complejidad subexponencial –su orden es una potencia de la raíz cúbica del número de *bits* de la instancia– y el algoritmo cuántico de Shor (Nielsen y Chuang, 2000) tiene una complejidad polinomial, de orden cúbico, pero involucra un orden lineal de *qubits*. El modelo NMR de computadoras cuánticas (Lieven y otros, 2001) no significa ningún riesgo para los protocolos actuales. Por otro lado, la criptografía cuántica está basada en la idea de transmitir una secuencia de parejas de partículas entrelazadas, dando de cada pareja una al emisor y otra al receptor. Como no se está pasando información entre emisor y receptor, ésta no se puede interceptar; así se está aprovechando un efecto cuántico. Es como si las partículas tuvieran la facultad de telepatía para comunicar sus características a distancia. Algunos componentes ya están siendo comercializados –están teniendo más fuerza que las computadoras en sí. La transmisión se logra utilizando fotones individuales enviados entre el emisor y el receptor a través de una fibra óptica. Como no se puede clonar la información transmitida sin conocer el estado cuántico descrito por la luz, si se intentara tener acceso a dicha información ésta se alteraría, ya no le serviría a quien está intentando conocerla y daría aviso a los propietarios de la misma. Estos protocolos ya están siendo distribuidos comercialmente, como en el caso de la compañía MagiQ Technologies Inc., que tiene su casa matriz en Boston.

Hoy día, empresas como MITRE⁹⁴ o MagicQ,⁹⁵ ofrecen productos basados en criptografía cuántica, en particular para que varias partes establezcan de manera segura claves privadas a través de distintos medios. Por su parte, la empresa canadiense D-Wave Systems Inc., anunció a inicios de 2007 un modelo propio que simula el cómputo cuántico mediante una arquitectura *escalable* de procesadores convencionales.

6. Conclusiones

La computación se ha desarrollado plenamente como una ciencia propia y ha llevado a la implementación de una gran cantidad y variedad de soluciones tecnológicas. Ha planteado importantísimos problemas de ingeniería, física y matemática, y sus repercusiones en otras ciencias han tenido tal significación que en muchas de ellas los métodos técnicos y formales de la computación han sido esenciales en sus avances. Se puede pensar en la biología celular, la lingüística, la medicina, la administración de empresas y burocracias, la identificación de patrones de comportamiento en la economía y sociología, por mencionar unos cuantos ejemplos. Se han identificado unos seis paradigmas tecnológicos a través de los últimos siglos que han abordado la pregunta básica de cómo computar información. Éstos forman una avenida de innovación de largo plazo con un ritmo de crecimiento exponencial en su desempeño. Se han expuesto varias alternativas tecnológicas para poder sostener la naturaleza de esta avenida de innovación, una vez que el paradigma actual del microprocesador llegue a su fin.

La integración de circuitos 3D constituye otra opción viable para el ahorro de energía, la disminución de espacio y el mejoramiento en el desempeño. Además, la integración en 3D permite mezclar diversidad de funciones en los circuitos; por ejemplo, memorias con mayor capacidad y velocidad, funciones dedicadas y lógica programable. No obstante, quedan algunos problemas por resolver antes de pasar a la etapa de producción. Entre los aspectos pendientes está el manejo del calor generado entre los componentes, los materiales a emplear y la falta de metodología para el diseño de los 3D-ICs. Sin embargo, la tecnología de integración en 3D ya es una realidad, y prueba de ello son las memorias DRAM.

La tecnología de la computación óptica está en las primeras etapas de su desarrollo. Los primeros resultados se han alcanzado en los laboratorios, pero aún no se ha podido llegar a la etapa comercial. En un intento por aprovechar las ventajas de la computación óptica, los investigadores han incluido algunos de los componentes ópticos a las computadoras actuales, y han construido equipos híbridos, con partes electrónicas y partes ópticas. Otra corriente de investigadores plantea la tecnología óptica desde un punto de vista más novedoso, sin tratar de imitar la electrónica desde la perspectiva de la óptica, sino con acercamientos no tradicionales que no serían físicamente posibles con los electrones. Un reto que sigue vigente es encontrar materiales que puedan ser obtenidos masivamente y a bajo precio. Mientras este problema no

⁹⁴ Para mayor información consúltese: <http://www.mitre.org/>

⁹⁵ Para mayor información consúltese: <http://www.magicqtech.com/>

sea resuelto, las computadoras ópticas seguirán sin aparecer en el mercado.⁹⁶ Se supone que en un plazo cercano estarán disponibles sistemas híbridos, óptico-electrónicos, que usen circuitos electrónicos y dispositivos ópticos para aprovechar las ventajas de ambas tecnologías.

Con la computación molecular se espera lograr el procesamiento de información más rápido –al aprovechar el paralelismo masivo–, ocupar menos espacio y ahorrar energía. De manera similar a lo que ocurre con otras tecnologías nuevas, no debe esperarse que la computación molecular compita con las computadoras digitales en los mismos campos de aplicación. Los mayores beneficios de la computación molecular serán obtenidos en aquellos problemas que por su naturaleza requieren todas las propuestas de soluciones. Poder hacer esto usando el paralelismo masivo permitirá resolver problemas que por ahora, por el consumo de tiempo, son imposibles de dilucidar. La potencialidad de las computadoras moleculares está en la capacidad de memoria y el procesamiento paralelo.

El algoritmo de Shor, publicado hace ya 13 años, hace que la computación cuántica sea vista como un elemento que habrá de desafiar los protocolos de comunicación en boga, cuando las limitaciones tecnológicas actuales hayan sido superadas. Luego de resolver el problema de factorización, el problema del logaritmo discreto también podría resolverse de manera efectiva mediante un algoritmo cuántico que utiliza la parte medular del algoritmo de Shor: el cálculo de órdenes de elementos en un grupo cíclico. Consecuentemente, uno de los intereses fundamentales de la criptografía es desarrollar métodos robustos para resolver los problemas de factorización y del logaritmo discreto. La computación cuántica es aún un paradigma lógicamente viable que no ha sido implementado a plenitud debido a limitaciones tecnológicas. Como se ha visto, quedan muchos temas que investigar y resolver, pero en un plazo de unas dos décadas seguramente se producirán avances notables.

Estas nuevas tecnologías, individualmente o combinadas entre sí y con la tecnología digital, ofrecen un potencial muy grande para el desarrollo de las tecnologías de la información y de las comunicaciones. Es importante considerarlas como candidatos para constituir el próximo paradigma en la evolución de los sistemas tecnológicos de la computación.

*b. Software e inteligencia artificial*⁹⁷

El concepto de *software* se refiere al conjunto de programas y procedimientos necesarios para hacer posible la realización de una operación de información específica.

⁹⁶ Algunos investigadores estiman que faltan por lo menos 15 años para poder ver estas computadoras en el mercado.

⁹⁷ Esta sección ha sido elaborada por Osvaldo Cairó del Departamento Académico de Computación, Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM).

La definición de la secuencia de un procedimiento efectivo constituye su algoritmo, tal como se ha presentado en la primera parte del libro. Los algoritmos contienen algún conocimiento específico, como la adición de dos números o la extracción de su raíz o también la respuesta a preguntas de carácter cualitativo. La ciencia que se refiere a este conjunto de procesos ha sido denominada inteligencia artificial (IA), porque apunta a la capacidad de aplicar una lógica, es decir, un proceso de razonamiento con un objetivo concreto, e imitar el comportamiento y la comprensión humana con herramientas tecnológicas. En este capítulo se presenta una introducción integral a las bases de la inteligencia artificial, los diferentes enfoques, incluyendo las dudas y cuestionamientos sobre esta disciplina, y sus avances y aplicaciones.

1. La idea de crear inteligencia artificialmente

En el libro de texto estándar sobre el tema inteligencia artificial, Russell y Norvig (2002) señalan: “El problema que aborda la inteligencia artificial es uno de los más complejos: ¿cómo es posible que un diminuto y lento cerebro, sea biológico o electrónico tenga capacidad para percibir, comprender, predecir y manipular un mundo que en tamaño y capacidad lo excede con creces?”. Formalmente la disciplina surge en 1956 cuando se acuña el término en la Conferencia de Dartmouth (McCarthy, Minsky y Rochester, 1955), aunque ya existían algunos trabajos previos, unos de ficción científica, otros de ciencia ficción.

La IA se dedica al diseño y desarrollo de artefactos, especialmente *software*, que deben actuar en forma racional o *inteligente*. Muchas actividades que realizan los humanos, como resolver ciertos problemas matemáticos, realizar juegos como ajedrez o damas, buscar información relevante, detectar patrones, traducir idiomas, pilotar un avión o enviar un robot a Marte requieren de inteligencia. Si las máquinas o programas pueden desarrollar con éxito estas actividades, entonces también les debemos atribuir un cierto grado de inteligencia. A esto precisamente nos referimos con *inteligencia artificial* (Cairó, 2007). La asociación Estadounidense para el Desarrollo de la Inteligencia Artificial (*American Association for Artificial Intelligence*) la define como: *la comprensión científica de los mecanismos que fundamentan el pensamiento y el comportamiento inteligente, y su incorporación en las máquinas*. John McCarthy, (McCarthy, s/f), uno de los fundadores de esta disciplina, la define como: *la ciencia y la ingeniería de hacer máquinas inteligentes, especialmente programas de computadoras inteligentes*.

Esta definición lleva a la pregunta: ¿qué es la inteligencia? La mayoría de los científicos coincide en que este concepto cubre muchos aspectos de las habilidades mentales, así como la eficiencia con la que éstas se realizan. Sin embargo, cuando se les pidió a alrededor de veinte destacados expertos que definieran el concepto de *inteligencia*, en lugar de obtener expresiones similares en cuanto al significado, se recibieron declaraciones diferentes (Sternberg y Detterman, 1986). El 13 de diciembre de 1994, el diario *The Wall Street Journal* publicó una lista de las 25 frases que mejor describían el concepto de inteligencia. La primer frase decía: *“inteligencia es una capacidad mental general que, entre otras cosas, involucra la capacidad para razonar,*

planear, resolver problemas, pensar abstractamente, comprender ideas complejas, y aprender rápidamente y de la experiencia". Ian Deary (2001) señala que infortunadamente aún no existe una *teoría de la inteligencia humana*. No sabemos suficiente sobre el funcionamiento del cerebro como para decir por qué algunos cerebros parecen más eficientes que otros. En realidad, ni siquiera se puede precisar aún si se debe hablar de *inteligencia, inteligencias o múltiples inteligencias* (Gardner, 2006). Piaget (1999) afirma que *"la inteligencia no es más que un término genérico que designa las formas superiores de organización o de equilibrio de las estructuras cognoscitivas"*. Marvin Minsky (1990), uno de los precursores de IA, considera que *"es solamente una palabra que la gente utiliza para nombrar procesos desconocidos que realiza el cerebro para resolver problemas"*.

Estas dos últimas definiciones son adoptadas por algunos de los críticos del término inteligencia artificial. Se define el término inteligencia como procesos cognitivos no entendidos, y se declara al mismo tiempo que al momento de la comprensión y reconstrucción de un proceso ya no hacen parte de la inteligencia. En principio, esta lógica sigue el ya mencionado teorema de Hofstadter (1979): cualquier función intelectual que realice una máquina, deja de ser considerada esencial para la inteligencia humana. La diferencia es el énfasis en la última palabra del teorema, que lleva a una definición dinámica de la frontera entre inteligencia biológica e inteligencia artificial. Según esta definición dinámica de la inteligencia, es probable que, hace unos cien años, una persona común y corriente hubiera clasificado una máquina que tenga la capacidad de "escuchar y recitar" poemas en diferentes idiomas como una máquina inteligente. Para esta persona, la máquina tenía habilidades superiores a cualquier animal e incluso a muchos humanos. Una vez que se comprende cómo la máquina hace lo que hace, esta función deja de formar parte de nuestra definición del concepto de inteligencia. No sorprende que reflexiones de este tipo sean objeto de una polémica inherente a la ciencia de la IA (se ahondará en esta discusión más adelante).

Considerando que el poder del pensamiento humano ha sido valorado y reconocido desde la antigüedad, es natural ahora que una disciplina como la IA, que presuntamente posee los medios para llevar la inteligencia a la máquina, provoque tanta polémica. Minsky expresó con optimismo 25 años atrás –en una etapa de conceptualización– que para los años noventa, con el arribo de las máquinas de quinta generación, prácticamente todo el intelecto humano estaría bajo el dominio de la máquina: *el problema de crear inteligencia estaría resuelto en gran medida*. En nuestros días, aunque podemos observar avances trascendentes en el área, la máquina *Deep Blue* ganándole al campeón mundial de ajedrez Garry Kasparov, los robots geológicos *Spirit* y *Opportunity* recorriendo Marte, los autopilotos en los aviones comerciales reduciendo el riesgo de aterrizaje durante un temporal y, en general, con una gran cantidad de *software* y máquinas mostrando un comportamiento que los humanos podemos asociar con el concepto de inteligencia, estamos muy lejos aún de alcanzar lo que Minsky pronosticó. En gran parte, porque existen aspectos de los procesos mentales que no se conocen lo suficiente como para poder formalizarlos, y por tanto, imitar y reconstruirlos. Aunque ha habido grandes avances en la comprensión de procesos inteligentes durante las décadas pasadas, la versatilidad de la mente humana todavía está lejos de poder entender su lógica por completo.

Kurzweil (2001) afirma que en el cerebro residen 100.000 millones de neuronas (10^{11}), que tienen 1.000 (10^3) conexiones cada una y efectúan en promedio 200 (2×10^2) operaciones básicas por segundo. Dado que el funcionamiento básico de un impulso neuronal no parece muy diferente de una instrucción computacional, esto implica que para emular al cerebro humano se necesitarían procesar alrededor de 2×10^{16} MIPS (millones de instrucciones por segundo).⁹⁸ Moravec (2003) señala que se necesitarían aproximadamente 10^{14} MIPS para emular el peso medio de 1,5 kg del cerebro humano que contiene 100.000 millones de neuronas.⁹⁹ Otros investigadores establecen que cada neurona tiene de 5.600 a 60.000 conexiones *dendríticas* provenientes de otras neuronas y que realizan 1.000 operaciones por segundo. Teniendo en cuenta estos datos, para emular la capacidad del cerebro humano se necesitarían aproximadamente 6×10^{18} MIPS.¹⁰⁰ Si las computadoras actuales pueden procesar 1.000 MIPS (10^9) y para emular un cerebro humano se necesitarían alrededor de 100 millones de MIPS (10^{14}), entonces podríamos inferir que las computadoras personales de la actualidad pueden exhibir una capacidad cuantitativa similar a 0,015 gramos o $1 \times 10^{-5}\%$ del cerebro humano, o bien una capacidad cuantitativa similar a la del sistema nervioso de un insecto. A pesar de esta realidad, es impactante ver qué tipo de funciones las máquinas ya están ejecutando hoy día. En este tipo de cálculos, es importante reconocer el crecimiento exponencial del desempeño de las computadoras, que sigue vigente desde hace más de cien años, como se ha explicado en la segunda parte del libro. Kurzweil (2001) asevera que, en caso que esta tendencia continúe, una máquina cuyo precio sea de 1.000 dólares lograría la capacidad cuantitativa de un cerebro humano alrededor del año 2023, y cerca del año 2049, una máquina que cueste 1.000 dólares lograría ejecutar tantas instrucciones por segundo como la totalidad de los habitantes de nuestro planeta tiene impulsos neuronales por segundo.

Como se puede advertir claramente, las estimaciones presentadas están basadas en datos ambiguos, imprecisos, inciertos, que dificultan la obtención de mediciones confiables.¹⁰¹ Las comparaciones, además, son cuantitativas –procesamiento de números de instrucciones– y no se consideran aspectos cualitativos del modelo que describen la eficiencia y sabiduría o un tipo de *conciencia o creatividad*, que seguramente son los valores más preciados de los humanos. Estos desacuerdos en las estimaciones, como Neisser (Neisser y otros, 1996) señala, no deben ser un obstáculo, porque rara vez las investigaciones científicas comienzan con acuerdos sobre los sig-

⁹⁸ El objetivo de estas predicciones es poder establecer una analogía entre dos máquinas: el cerebro humano y una computadora.

⁹⁹ La máquina de ajedrez *Deep Blue*, que le ganó una partida al campeón mundial de ajedrez Garry Kasparov, en 1997 utilizaba *chips* que le permitían realizar 3 millones de MIPS.

¹⁰⁰ El cálculo es: $10^{11} \times (6 \times 10^4) \times 10^3 = 6 \times 10^{18}$.

¹⁰¹ Obsérvese que entre la última estimación – 6×10^{18} MIPS– y la anterior – 2×10^{16} MIPS– la diferencia es de 300, y entre la última valoración y la realizada por Moravec, la diferencia es de 12.000. Esto implica, por ejemplo, que el cerebro humano concebido por un grupo de científicos es muchísimo más rápido –12.000 veces– que el concebido por otro investigador.

nificados de los conceptos. Las impresiones de números o conceptos no eliminan la necesidad de reflexionar sobre la relación de la capacidad de la inteligencia biológica y artificial y su coevolución dinámica.

2. *Historia de la inteligencia artificial*

Como cualquier fase de conceptualización de un paradigma científico en el sentido de Kuhn (1962), los comienzos de la IA se caracterizaron por un juego entre ciencia ficción y ficción científica, que llevan a nuevas ideas y emprendimientos. En 1942, el escritor y bioquímico ruso, Isaac Asimov, describió en su libro de ciencia ficción, *Runaround*, las famosas tres leyes de la robótica. Los robots de Asimov basaban su raciocinio e inteligencia en cerebros artificiales *positrónicos*. Las leyes eran formulaciones impresas en los cerebros de las máquinas, que éstas debían obedecer en todo momento.¹⁰² Engelberger, quien en 1958 construyó el primer robot industrial llamado *unimate*, atribuyó su fascinación por los robots a las obras de Asimov. Si bien los libros de este autor han sido muy estimulantes, los primeros en presentar un trabajo sobre *inteligencia artificial* fueron el neurofisiólogo Warren McCulloch y el matemático Walter Pitts (McCulloch y Pitts, 1943). El artículo trataba sobre la fisiología básica y el funcionamiento de las neuronas del cerebro, el análisis formal de la lógica proposicional de Bertrand Russell y Alfred Whitehead, y la teoría computacional de Alan Turing. La investigación fue muy importante por diferentes razones: representó el primer trabajo sobre IA, se analizó al cerebro como un organismo computacional, y se propuso la construcción de computadoras con una estructura abstracta similar a la de las redes neuronales biológicas.

Las neuronas propuestas por McCulloch y Pitts son elementos de actividad binaria. El valor de actividad de cada neurona –0 o 1–, depende del valor de actividad de sus entradas, cada una de ellas ponderada de acuerdo con un coeficiente denominado *peso sináptico*. Cuando es estimulada a través de sus entradas y se alcanza un cierto umbral, la neurona se dispara o activa, pasando una señal a un *axón*. La contribución de McCulloch y Pitts fue, indudablemente, el fundamento de las *redes neuronales artificiales*, RNA, actuales. Después de seis años, el fisiólogo Donald Hebb (1949) señaló que las redes neuronales podían *aprender*, si se reconfiguraban las intensidades de conexiones entre neuronas. Hebb explicó que la repetida activación de una neurona por otra a través de una sinapsis determinada, aumenta su conductividad y la hace más propensa a ser activada sucesivamente. Esto, a su vez, induce a la formación de un circuito de neuronas estrechamente conectadas entre sí. Es importante observar que Hebb fue el primero en explicar el proceso de *aprendizaje* de una red neuronal artificial (RNA).

¹⁰² Las tres leyes señalan: 1) Un robot no puede hacer daño a un ser humano o, por inacción, permitir que un ser humano sufra daño. 2) Un robot debe obedecer las órdenes dadas por los seres humanos, excepto si estas órdenes entraran en conflicto con la *primera ley*. 3) Un robot debe proteger su propia existencia en la medida en que esta protección no entre en conflicto con la *primera* o la *segunda ley*.

Ya en la década de los cincuenta, Claude Shannon (1950), el padre de la *teoría de la información*, publicó un artículo en el que describía cómo una máquina o computadora podía ser capaz de jugar razonablemente bien al ajedrez. Shannon utilizaba el método *mínimax*, que se apoya en una función de evaluación, para decidir el mejor movimiento de una pieza en el tablero. Ese mismo año, el matemático, criptógrafo y filósofo Alan Turing (1950) publicó *Computing Machinery and Intelligence (Las máquinas de computación y la inteligencia)*,¹⁰³ en el que presentaba una prueba –*la prueba de Turing*– con la que intentaba ofrecer una definición operativa de lo que es la inteligencia. Turing sostenía que si una máquina se comportaba en todos los aspectos como inteligente, entonces se debería considerar inteligente.

En 1951, Marvin Minsky y Dean Edmonds construyeron el primer simulador de redes neuronales, al que denominaron SNARC. La máquina estaba compuesta por 3.000 bulbos y simulaba una red neuronal de 40 neuronas. En 1952, Arthur Samuel, de IBM, escribió el primer programa para jugar *damas*. Aunque el comportamiento del programa no le permitía competir contra los buenos jugadores, fue un acontecimiento importante en la programación de IA. Samuel también pudo demostrar que las computadoras no hacían solamente lo que se les ordenaba, como consideraba Lady Lovelace.¹⁰⁴ Su programa aprendió, se convirtió en un buen jugador y terminó comportándose, incluso, mejor que su creador.

Estos fueron los antecedentes para la conferencia orientadora de Dartmouth de 1956. La conferencia organizada por John McCarthy (Dartmouth College), Marvin Minsky (Universidad de Harvard), Nathaniel Rochester (IBM Corporation) y Claude Shannon (Bell Telephone Laboratories) marca un hito en la historia de la IA, porque además de acuñar el término *inteligencia artificial*, se llegó a la definición de las suposiciones básicas del núcleo teórico de la IA:

- a. El reconocimiento de que el pensamiento puede ocurrir fuera del cerebro, es decir, en máquinas.
- b. La suposición de que el pensamiento puede ser comprendido de manera formal y científica.
- c. La suposición de que la mejor forma de entenderlo es por medio de computadoras digitales.

En esa misma conferencia, el multifacético y Premio Nobel de Economía, Herbert Simon¹⁰⁵ y el físico Allen Newell llamaron la atención, porque presentaron el primer

¹⁰³ El artículo completo se puede consultar en: <http://loebner.net/Prize/TuringArticle.html>

¹⁰⁴ La objeción de Lady Lovelace: *the machine can only do what we tell it to do* (la máquina sólo puede hacer lo que se le ordena).

¹⁰⁵ Herbert Simon, conocido como el *polymath* por sus investigaciones en el campo de la psicología cognitiva, computación, inteligencia artificial, administración pública, filosofía y sociología económica, fue galardonado con el Premio Nobel de Economía en 1978, por sus investigaciones en el proceso de toma de decisiones en organizaciones económicas.

programa de IA, que llamaron *teórico lógico* (*logic theorist*). Con el programa, capaz de demostrar teoremas matemáticos representando cada problema como un modelo de árbol, se pudo demostrar 38 de los 52 teoremas del segundo capítulo de *Principia Mathematica* de Russell y Whitehead.

Desde Dartmouth hasta 1970

En los años siguientes a la Conferencia de Dartmouth las investigaciones continuaron y produjeron grandes esperanzas, por no decir ilusiones, que resultarían imposibles de cumplir. El futuro se presentaba brillante y los investigadores, en consecuencia, eran muy optimistas. En 1958 se estimó, por ejemplo, que las computadoras serían campeonas de ajedrez en 10 años. La frase que mejor expresa la euforia de la época fue la que pronunció Simon: *Sin afán de sorprenderlos y dejarlos atónitos, debo informarles lisa y llanamente que en la actualidad en el mundo existen máquinas capaces de pensar, aprender y crear. Además, su capacidad para hacer lo anterior aumentará rápidamente hasta que –en un futuro previsible– la magnitud de problemas que tendrán capacidad de manejar irá a la par con la capacidad de la mente humana para hacer lo mismo* (Simon y Newell, 1958). Y en 1965, volvió a señalar: *Las máquinas serán capaces, dentro de veinte años, de hacer cualquier trabajo que un hombre puede hacer* (Simon, 1965).

Respecto a las contribuciones del período, en 1957, Allen Newell y Herbert Simon (1972) presentaron el *solucionador general de problemas* (*general problem solver*), *GPS*. El método, aunque diseñado para resolver problemas generales, podía solucionar problemas bien definidos, teoremas en lógica o geometría, rompecabezas, y otros. El GPS fue además la base para otras teorías de Newell, como SOAR (Laird, Newell y Rosenbloom, 1987) y GOMS (Card, Moran y Newell, 1983). En 1958, John McCarthy se trasladó de Dartmouth al MIT,¹⁰⁶ y allí desarrolló el lenguaje de programación simbólica y funcional *LISP* (McCarthy, 1960).¹⁰⁷ En 1962, McCarthy se marcha a la Universidad de Stanford y funda el laboratorio de inteligencia artificial. Ese mismo año, Engelberger instaló el primer robot industrial en la empresa General Motors. En 1963, Feigenbaum y Feldman publicaron *Computers and Thought* (*Las computadoras y el pensamiento*), el primer libro que incluye 20 artículos sobre IA de pioneros del área como Alan Turing, Marvin Minsky y Herbert Simon.

En 1964, Daniel Bobrow, en su disertación en el MIT, presentó el programa llamado *Student*, que comprende *lenguaje natural* suficientemente bien como para resolver problemas de álgebra. En 1965, Joseph Weizenbaum, del MIT, construyó *Eliza*, un programa interactivo que puede sostener un diálogo en inglés, sobre una gran variedad de tópicos. En 1966, Ross Quillian, en su disertación para doctorarse en el

¹⁰⁶ Por su sigla en inglés: Massachusetts Institute of Technology.

¹⁰⁷ LISP –list processing– es el segundo lenguaje de programación más antiguo que aún se utiliza. El primero es Fortran.

Instituto de Tecnología Carnegie, también en Estados Unidos,¹⁰⁸ presentó las *redes semánticas*, el primer método que se utiliza para *representación del conocimiento*. Ese mismo año, Donald Michie comienza a impartir en la Universidad de Edimburgo, en el Reino Unido, una serie de talleres sobre máquinas inteligentes. En 1967, Edward Feigenbaum, Joshua Lederberg¹⁰⁹ y Bruce Buchanan, desarrollaron en la Universidad de Stanford Dendral, el primer *sistema que funcionaba sobre la base de conocimientos*. El objetivo del sistema era determinar la estructura química molecular de un compuesto orgánico a partir de datos producidos por un espectrógrafo de masa.

En 1968, Marvin Minsky y Seymour Papert (1969) publicaron el libro *Perceptrón: una introducción a la geometría computacional*, en el que presentan los límites de las redes neuronales simples. Minsky, el hombre que construyó la primera máquina que realizaba simulaciones neuronales, demostró en este libro teoremas que desechaban gran parte de las investigaciones previas sobre redes neuronales. Roger Schank, en 1969, definió el modelo de *dependencia conceptual* para la *comprensión del lenguaje natural* (Schank, 1972).

Entre realidades y desengaños: desde 1970 hasta 1980

A diferencia del período anterior en el que el futuro se observaba brillante, este comenzó con algunos sinsabores, ya que salió a la luz la *intratabilidad* de muchos de los problemas que se estaba intentando resolver con las técnicas más convencionales de IA. La incapacidad para manejar correctamente la *explosión combinatoria* fue otro obstáculo mayor, y la gobernabilidad de la *conducta inteligente* por medio de una máquina no era precisamente como se había intuido inicialmente. Muchos se refieren a este período de ajuste de expectativas como el “invierno de IA” (*AI winter*). No obstante los obstáculos señalados, en esta etapa se hicieron contribuciones muy importantes.

Jaime Carbonell (1970), en los inicios de la década, desarrolló *Scholar*, el primer *sistema tutor inteligente*, un programa interactivo basado en *redes semánticas* que enseñaba geografía de Suramérica y conducía la sesión por medio de un diálogo. En el mismo año, Bill Woods (1970) presentó las *redes de transición aumentada* (ATN, por su sigla en inglés) para el análisis del *lenguaje natural*. En 1971, Terri Winograd, en el laboratorio de IA del MIT, presentó *SHRDLU*,¹¹⁰ un programa para la comprensión del lenguaje natural que entendía instrucciones y manipulaba el brazo de un robot para trabajar con bloques. En 1972, Alain Colmerauer diseñó el lenguaje de programación lógica *Prolog*, y William Woods (1972) elaboró *Lunar*, un *sistema que fun-*

¹⁰⁸ Hoy conocida como la Universidad Carnegie Mellon.

¹⁰⁹ Joshua Lederberg fue galardonado con el Premio Nobel de Fisiología o Medicina en 1958, por sus descubrimientos acerca de las combinaciones genéticas y la organización del material genético de las bacterias.

¹¹⁰ Sobre *SHRDLU*, consúltese: <http://hci.stanford.edu/~winograd/shrdlu/>

cionaba sobre la base de conocimientos, y que permitía a los geólogos realizar consultas en inglés sobre las muestras de piedras que habían sido traídas de la Luna por los astronautas del *Apollo 11*.

En 1974, Ted Shortliffe (1974), en su disertación para obtener el grado de doctor en la Universidad de Stanford, presentó el *sistema experto Mycin*. El sistema, escrito en LISP, diagnosticaba enfermedades infecciosas de la sangre, podía mostrar el proceso de razonamiento que seguía para llegar al diagnóstico y recetar medicamentos personalizados a cada paciente, en función de su condición de salud, estatura, peso y edad. El funcionamiento de Mycin dependía de un *motor* que manejaba una *base de conocimientos* de aproximadamente 500 *reglas de inferencia*. Además, contaba con un método para el tratamiento de la incertidumbre, *factores de certeza*, que correspondía con la forma en que los médicos ponderaban la evidencia cuando hacían un diagnóstico. En el mismo año, Pople y Myers presentaron el *sistema experto Internist*, que diagnosticaba sobre enfermedades de medicina interna, y Earl Sacerdoti (1974) desarrolló el primer programa de planificación *Abstrips*.

En la otra mitad de la década, en 1975, Marvin Minsky publicó un artículo sobre *Frames*¹¹¹ –marcos– para la representación del conocimiento. El método permitía recopilar información sobre un objeto particular y ciertos eventos, y organizar estos tipos en grandes jerarquías taxonómicas, similares a las de la biología. En 1979, Duda (Duda, Gaschnig y Hart, 1979) y su equipo de investigación desarrollan *Prospector*, un *sistema experto* en prospección geológica, que permitió localizar yacimientos de molibdeno en el estado de Washington, en Estados Unidos, valorados en 100 millones de dólares. El sistema experto utilizaba un *modelo probabilístico bayesiano* para aproximar su conocimiento. En el mismo año, Hans Moravec (1983) de la Universidad de Stanford presentó *The Stanford Cart* (gráfico 1), el primer vehículo autónomo controlado por computadora. El robot pudo atravesar una habitación llena de sillas en aproximadamente 5 horas, sin ninguna intervención humana.

También en 1979, Douglas Hofstadter (1999) publicó *Gödel, Escher y Bach: An Eternal Golden Braid* (*Gödel, Escher, Bach: un eterno y grácil bucle*). El libro, que inspiró a miles de estudiantes a comenzar sus carreras en computación e iniciar estudios en inteligencia artificial, le permitió a Hofstadter ganar el *Premio Pulitzer* en 1980 en la categoría general no-ficción.

La IA se convierte en una industria: desde 1980 hasta la fecha

En este período la *inteligencia artificial* se convierte en una verdadera industria multimillonaria. Es la época en que cientos de productos derivados de tecnología de IA se comienzan a comercializar en todo el mundo. En 1980, Lee Erman, Rick Hayes-Roth, Victor Lesser y Raj Reddy (Erman y otros, 1980) publicaron su primera versión del *modelo de pizarrón*, para el sistema *Hearsay-II*, construido para la comprensión

¹¹¹ Sobre *Frames*, consúltese: <http://web.media.mit.edu/~minsky/papers/Frames/frames.html>

de la voz. En el mismo año, en Stanford, se celebra la *First National Conference of the American Association of Artificial Intelligence*, AAAI (Primera Conferencia Nacional de la Asociación Estadounidense para el Desarrollo de la Inteligencia Artificial). En 1981, Danny Hillis (1989) diseña en el MIT la máquina conexionista, una supercomputadora compuesta por máquinas seriales más pequeñas, que operan concurrentemente e intercambian mensajes entre ellas, y la primera arquitectura que se contraponía a la tradicional de Von Neumann. La máquina fue diseñada para realizar aplicaciones de inteligencia artificial y procesamiento simbólico, aunque más tarde también tuvo mucho éxito en el campo de la ciencia de la computación. Hillis y Handler unos años más tarde fundaron la empresa Thinking Machines, en Massachusetts. En 1982, el primer *sistema experto* comercial, *RI*, debutó en *Digital Equipment Corporation*; el programa se utilizaba para configurar los equipos *Digital* de acuerdo con las necesidades de los clientes. A mediados de la década, las *redes neuronales* comenzaron a utilizar el algoritmo de *propagación hacia atrás*, introducido por Werbo en 1974. El algoritmo, de *aprendizaje supervisado*, se utiliza incluso en la actualidad para entrenar a las redes neuronales artificiales.

En 1986, la computadora *Deep Blue* le ganó dos partidos de ajedrez a Garry Kasparov, aunque el resultado final fue 4-2 a favor del campeón mundial; *Deep Blue* calculaba en ese entonces 100 millones de jugadas por segundo. Es interesante que este poder computacional le permitió ser más efectiva que una persona, aun si carecía de la sensibilidad necesaria para apoderarse de la sutileza del juego posicional, el sello de la verdadera maestría según el juicio humano. Esta situación relanza la polémica sobre la definición de diferentes tipos de inteligencia. En mayo de 1997, en una escena diferente, una nueva y mejorada computadora *Deep Blue* se impuso y derrotó a Kasparov por un marcador de 3,5-2,5. En 2003, Kasparov se enfrentó a la computadora israelí *Deep Junior*, tres veces consecutivas campeona mundial de máquinas, y el resultado fue un empate 3-3. En 2005, *Hydra*, la máquina más poderosa del mundo, ubicada físicamente en Abu Dhabi en los Emiratos Árabes Unidos, derrotó contundentemente al séptimo en el escalafón internacional, Michael Adams, 5,5-0,5. *Hydra* puede analizar jugadas a 18 niveles de profundidad y realizar análisis de 200 millones de jugadas por segundo.

En 1987, Marvin Minsky (1987) publicó el libro *The Society of Mind* (*La sociedad de la mente*), una descripción teórica de la mente como una colección de agentes cooperativos. En el mismo año John Laird, Allen Newell y Paul Rosenbloom (Laird, Newell y Rosenbloom, 1987) presentaron *SOAR*, la arquitectura de agente total. En 1989, Dean Pomerleau (1989) desarrolló el primer vehículo autónomo *Alvinn*, en la Universidad Carnegie Mellon de Estados Unidos. El vehículo fue capaz de conducir –al tomar como referencia las entradas visuales y experiencias previas– desde Washington, D.C. hasta San Diego, durante el 98% del trayecto, de los casi 4.500 km de recorrido. En 1990 se presentaron avances notables en los siguientes campos: *aprendizaje de máquina* (Mitchell, 1997); *sistemas tutores inteligentes* (Sawyer, 2006; Beck, Stern y Haugsjaa, 2004); *razonamiento basado en casos* (Aamodt y Plaza, 1994; Watson, 1997; Leake, 1996); *planificación* (Palmer, 1999; Dean y Kambhampati, 1997); *razonamiento probabilístico* (Pearl, 2000; Shafer y Pearl, 1990);

*minería de datos*¹¹² (Wright, 1998; Han y Kamber, 2001); *comprensión y traducción de lenguaje natural*¹¹³ (Jurafsky y Martin, 2000); *realidad virtual* (Burdea y Coiffet, 2003); y *visión artificial*¹¹⁴ (Paragios, Chen y Faugeras, 2005).

En la floreciente industria de IA figuraban también compañías como Carnegie Group, Inference, Intellicorp y Teknowledge, que disponían de herramientas de *software* para la construcción de sistemas expertos, y empresas de *hardware* como Lisp Machines Inc, Texas Instruments, Symbolics y Xerox, en las que se construían estaciones de trabajo para el diseño de programas en Lisp (Russell y Norvig, 2002).

Respecto a los robots, en 1997 se llevó a cabo en Nagoya, Japón, la primera competencia mundial *robocup soccer*, en la que participaron 40 equipos de fútbol y más

Figura 13.1

STANFORD CART¹¹⁵ Y LOS ROBOTS
SPIRIT Y *OPPORTUNITY* EN MARTE¹¹⁶



¹¹² Dakshi Agrawal es considerado el padre de la minería de datos. Para obtener información sobre sus actividades y publicaciones consúltese: <http://www.research.ibm.com/people/a/agrawal/>. La ACM tiene un grupo de interés en *descubrimiento de conocimiento y minería de datos*: <http://www.acm.org/sigs/sigkdd/>

¹¹³ Una muy buena introducción al lenguaje natural realizada por Patrik Doyle –*Natural Language. AI Qual Summary*– en: <http://www.cs.dartmouth.edu/%7Ebrd/Teaching/AI/Lectures/Summaries/natlang.html>

¹¹⁴ La Universidad Carnegie Mellon tiene una página *web* excelente sobre *visión por computadora*: <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/cil/ftp/html/vision.html>

¹¹⁵ Imagen tomada de la página: http://www.stanford.edu/~learnest/cart_files/image008.jpg

¹¹⁶ Imagen tomada de la página: <http://www.pacfs.org/wp/wp-content/uploads/2006/03/spirit-opportunity%20-%20large.jpg>

de 5.000 espectadores. En 2000, Cynthia Breazeal¹¹⁷ del MIT, en su disertación sobre máquinas sociables, presentó el robot *Kismet* que expresa emociones faciales. En 2004, los robots espaciales geológicos *Spirit* y *Opportunity* (véase la figura 13.1) arribaron al planeta rojo, Marte, para analizar los restos orgánicos presentes en las rocas de la superficie. En febrero de 2006, la sonda espacial *Mars Express*, el vehículo europeo que se encuentra en órbita en torno a Marte, entabló comunicación con el robot *Spirit* fuera de los límites de nuestro planeta, lo que constituyó un acontecimiento sin precedentes.

Los casos analizados representan sólo una pequeña muestra de la literatura básica del tema, y se presentan algunos artefactos, máquinas y *software*, que se pueden elaborar por medio de la inteligencia artificial. Muchos de estos ejemplos hubieran sido considerados como de ciencia ficción años atrás, pero en nuestros días son una realidad.

3. Los diferentes enfoques de la inteligencia artificial

Los resultados alcanzados por la disciplina en cincuenta años de esfuerzo son evidentes y sorprendentes. Durante todos estos años ha habido lógicamente diferentes enfoques, algunos concentrados en los modelos mentales y otros de tipo conductistas, algunos enfocados en la eficiencia humana y otros más cerca del concepto ideal de inteligencia, conocido como racionalidad. Cada uno de estos enfoques pertenece a un intervalo de tiempo más o menos definido, que coincide con la presencia, la visión, el optimismo, en algunos casos, la desilusión y las contribuciones de ciertos investigadores. A continuación se presentan cuatro diferentes maneras de afrontar el desafío de crear inteligencia artificialmente (Russell y Norvig, 2002).

Sistemas que piensan como humanos

Uno de los primeros enfoques de la inteligencia artificial fue el del *modelo cognoscitivo, sistemas que piensan como humanos*.¹¹⁸ El enfoque coincide, en cierta medida, con la visión que tenían los pioneros de la IA, si se recuerda el optimismo de Simon y Minsky sobre esta disciplina.

La *psicología cognoscitiva* es el área de la psicología que estudia los procesos a través de los cuales el individuo obtiene conocimiento del mundo y toma conciencia de su entorno. Tiene como objeto de estudio los mecanismos básicos y profundos por los que se elabora el conocimiento, desde la percepción, la memoria y el aprendizaje, hasta la formación de conceptos y razonamiento lógico. El término comenzó a usarse con la publicación del libro *Cognitive Psychology*, escrito por Ulrich Neisser (1967).

¹¹⁷ Una entrevista a Cynthia Breazeal sobre KISMET: <http://www.2001halslegacy.com/interviews/braezeal.html>

¹¹⁸ Información sobre *ciencia cognitiva*: <http://ls.berkeley.edu/ugis/cogsci/major/about.php>

Sin embargo, el acercamiento cognoscitivo se dio por medio de Donald Broadbent (1958) y su libro *Perception and Communication*. Desde ese momento, la metáfora predominante en el área ha sido el modelo de procesamiento de información de Broadbent.

Por otra parte, la *ciencia cognitiva*¹¹⁹ es un campo multidisciplinario que surge a mediados de la década de los setenta, como la intersección de ciertas disciplinas, incluidas psicología, lingüística, inteligencia artificial, filosofía, fisiología, neurología y antropología. Los investigadores intentaban desarrollar teorías de la mente basadas en representaciones complejas y procedimientos computacionales. Los científicos cognitivos estudian la naturaleza de la inteligencia desde un punto de vista psicológico, al construir modelos computacionales que ayudan a comprender lo que ocurre en la mente cuando se resuelven problemas, se recuerda, se percibe y otros procesos psicológicos. Los expertos presumen que la mente tiene representaciones mentales análogas a las *estructuras de datos* y procedimientos similares a los algoritmos computacionales. Los teóricos cognitivos han planteado que la mente contiene tales representaciones como proposiciones lógicas, reglas, conceptos, imágenes y analogías, y que se utilizan procedimientos mentales como la deducción, búsqueda, rotación y recuperación.¹²⁰

En general, dentro de las ciencias cognitivas se han hecho innumerables estudios y una gran cantidad de contribuciones al área, pero hasta el momento no se ha podido presentar una teoría sólida que *muestre* la forma de pensar de los humanos. Es importante observar que para elaborar un sistema que piense como los humanos, primero habría que definir la forma correcta en que piensan los humanos, la forma precisa en que razonan los humanos, lo cual hasta el momento se desconoce.

Una definición de *inteligencia artificial* bajo este enfoque fue propuesta por Haugeland (1989): *La interesante tarea de lograr que las computadoras piensen... máquinas con mente, en su amplio sentido literal.*

Sistemas que piensan racionalmente

El segundo enfoque es el aristoteliano, el de *las leyes del pensamiento: sistemas que piensan racionalmente*. Aristóteles fue el primero, en su obra *Organon*, en codificar la forma correcta de pensar, es decir procesos de pensamientos irrefutables. Sus famosos silogismos, esquemas de argumentación mediante los cuales siempre se llega a conclusiones verdaderas si se parte de premisas correctas. Dichas leyes del pensamiento debían gobernar la forma de operar de la mente humana. Así se inaugura el campo de la lógica (Russell y Norvig, 2002).

En este enfoque, indudablemente, se adopta a la *lógica* como una alternativa para representar el conocimiento. Todo el esfuerzo radica en realizar siempre inferencias

¹¹⁹ Cognoscitivo o cognitivo.

¹²⁰ Información sobre representación mental: <http://plato.stanford.edu/entries/cognitive-science/>

correctas. Pero el enfoque tiene dos obstáculos importantes. En primer lugar, es difícil tratar con el *conocimiento* que es rico, fluido, intuitivo, difícil de captar en términos lógicos, a veces impreciso o incierto, y expresarlo en los términos formales que exige la notación lógica. En segundo lugar, es muy diferente resolver *en teoría* un problema, y luego hacerlo realmente en la práctica (Russell y Norvig, 2002). Existe una gran cantidad de problemas del mundo real (aplicaciones), que agotarían rápidamente los recursos de la máquina (espacio, memoria), en la fase inicial. Incluso, si llegáramos a contar con la memoria apropiada, podríamos tener limitaciones de tiempo. Estos dos factores, espacio y tiempo, son críticos en la solución de problemas.

Considérese, por ejemplo, el problema tradicional del *puzzle 15*.¹²¹ Si quisiéramos enumerar todos los posibles estados del problema con una máquina que produjera estados a 1.000 nodos por segundo y tuviera la capacidad necesaria de almacenamiento, tardaríamos 662 años. Si en cambio tuviéramos una máquina que produjera estados a razón de 1 millón de nodos por segundo, nos demoraríamos 242 días. Este problema no es muy diferente del que se le presenta a un cartero, cuando tiene que entregar 16 cartas, y quiere encontrar la trayectoria óptima para hacer su recorrido ($16! \cong 2.09E13$ estados posibles).

Gráfico 13.3

PUZZLE 15

Estado inicial

1	3	8	14
5	7	15	9
4	12	13	
2	6	10	11

Estado final

1	2	3	4
5	6	7	8
	4	12	13
2	6	10	11

¹²¹ En el problema del *puzzle 15* existe un estado inicial y un estado final definido. El objetivo del problema consiste en llegar al estado final partiendo del estado inicial, por medio de un conjunto de movimientos. Los operadores son los que permiten realizar un movimiento –intercambiar una celda con número con la que se encuentra vacía. En el *puzzle* las operaciones permitidas son: mover a la izquierda, mover hacia arriba, mover a la derecha, mover hacia abajo.

Cabe señalar que si bien los dos primeros enfoques analizados se relacionan con procesos de pensamiento y razonamiento, mientras el primero se asocia al desempeño humano, el segundo se enfoca más a un concepto ideal de inteligencia. Una definición de *inteligencia artificial* bajo este enfoque es: *El estudio de las facultades mentales mediante el uso de modelos computacionales* (Charniak y McDermott, 1985).

Sistemas que actúan como humanos

El tercer enfoque fue motivado por la teoría conductista introducida por Thorndike (1874-1949) y Watson (1878-1958), con la cual rechazaban de cierta forma teorías en las que intervinieran procesos mentales e ideas imprecisas. Watson (1998) inauguró esta corriente de la psicología y se apoyó en las ideas de Pavlov y Thorndike; en ella defiende el empleo de procedimientos estrictamente experimentales para estudiar el comportamiento observable –la conducta–, considerando el entorno como un conjunto de *estímulos-respuestas*. La influencia inicial del conductismo en la psicología fue minimizar el estudio introspectivo de los procesos mentales, las emociones y los sentimientos, sustituyéndolos por el estudio objetivo de los comportamientos de los individuos en relación con el medio, mediante métodos experimentales. Los psicólogos conductistas han producido una cantidad ingente de investigaciones básicas dirigidas a comprender cómo se crean y se mantienen las diferentes formas de comportamiento.¹²²

El enfoque de *sistemas que actúan como humanos* se asocia frecuentemente a la *prueba de Turing* (1950). Por medio de la prueba, Alan Turing intentaba ofrecer una definición operativa de lo que es la inteligencia; define la conducta inteligente como “*la capacidad de lograr eficiencia a nivel humano en todas las actividades de tipo cognoscitivo, suficiente para engañar a un evaluador*”. La prueba consistía en que un humano, ubicado en una habitación, debía interrogar a una computadora –localizada en otra habitación– por medio de un teletipo. Turing señalaba que si una máquina podía engañar a un evaluador, de tal forma que éste no supiera si interactuaba con una máquina o con un humano, entonces la prueba se debería considerar superada.

Una refutación a la *prueba de Turing* fue propuesta por el filósofo John Searle (1980). El experimento mental conocido con el nombre de *la sala china* consiste en que un individuo ubicado en una habitación aislada, con una única ventana muy pequeña por la que se pueden hacer entrar y salir textos escritos en chino, debe interactuar con un observador externo. El individuo no sabe chino, pero en la habitación existen manuales que puede consultar y que indican las reglas que relacionan los caracteres de ese idioma. El objetivo del experimento consiste en manipular los símbolos para responder los textos recibidos, de tal forma de hacer creer al observador externo que se entiende la lengua. Dada esta situación, Searle señala: a) ¿entiende

¹²² Parte del párrafo fue extraído de: <http://www.monografias.com/trabajos13/teapre/teapre.shtml>

chino el individuo que se encuentra en la sala?, b) ¿entienden chino los manuales?, y c) ¿es la sala en conjunto la que entiende chino? Searle finalmente considera que o bien la sala comprende el idioma chino o bien la *prueba de Turing* no es demostración suficiente de inteligencia; finalmente, señala que hay una gran diferencia en entender algo y aparentar que se entiende –la máquina–, cuando en realidad no se entiende nada.

Ante los experimentos expuestos de Turing y Searle, cabe uno preguntarse si *actuar como humano* realmente implica que se deba poseer algún grado de inteligencia, o bien se puede proceder libremente de alguna forma que permita alcanzar resultados similares a los que obtienen los humanos.¹²³ La interpretación de los experimentos de la *prueba de Turing* y la *sala china* está en cierta medida asociada al significado de la palabra *actuar*.

Por último, es importante observar que independientemente de los experimentos descritos, el enfoque de *sistemas que actúan como humanos* fue el que prácticamente dominó la década anterior. Aunque se pudiera considerar más flexible y sólido que los anteriores, presenta, sin embargo, algunas debilidades. Por ejemplo, el que aprende o actúa sobre la base de la observación, en determinado momento podría encontrarse ante una situación en la que el estímulo para la respuesta correcta nunca sucede. Una máquina, por ejemplo, que se ha programado para ciertas actividades específicas, se podría detener en un determinado momento, si se encuentra ante una situación nueva o anormal en la que no conoce la respuesta por no comprender el sistema.

Una definición de *inteligencia artificial* bajo este enfoque es: *El arte de crear máquinas con la capacidad para ejecutar funciones que realizadas por humanos requieren de inteligencia* (Kurzweil, 1992).

Sistemas que actúan racionalmente

El último enfoque es el del agente racional: *sistemas que actúan racionalmente*, que es el enfoque que siguen actualmente la mayoría de los investigadores de IA. *Actuar*, indudablemente, impone muchas menos restricciones que *pensar*. Actuar es un hecho, es observable, implica una conducta, un comportamiento con resultado. Se puede simular, pero pensar es diferente. Es un concepto mucho más rico, más estimulante, pero también más restrictivo. No sabemos exactamente cómo piensan los humanos, ya que implica una retrospectiva. Hacer un viaje hacia el interior de nuestra mente, atrapar nuestros propios pensamientos, exteriorizarlos, y al verlos objetivados, poderlos formalizar. En otras palabras, en este enfoque se evita la discusión sobre si la máquina *Deep Blue* realmente está pensando o no, y si la lógica de la máquina en la *sala china* es similar a los procesos que vive un ser humano mientras llega a un resultado concreto.

¹²³ Las máquinas que juegan ajedrez actúan como humanos. Pueden alcanzar un resultado mediante la aplicación de procesos diferentes.

Racional implica realizar lo correcto y esto, en cierta medida, es subjetivo porque, ¿quién define lo que es correcto? Pero hay que observar que no se habla de racionalidad perfecta –siempre hacer lo correcto–, y menos de omnisciencia –conocer el resultado seguro que producirán nuestras acciones.

De acuerdo con este enfoque se considera a la IA como el estudio y construcción de agentes racionales. Una definición de IA con este punto de vista fue propuesta por Luger (2002): *La rama de la ciencia de la computación que se ocupa de la automatización de la conducta inteligente.*

4. Algunos campos de estudio de la inteligencia artificial¹²⁴

Como resultado de los diferentes enfoques y maneras de enfrentar el desafío, la disciplina actual de la inteligencia artificial incluye varias áreas de estudio, cada una con sus propias características, algunas interceptándose entre sí, otras sirviendo como base para el desarrollo de nuevas áreas. A continuación se presentan cuatro de las más importantes con sus conceptos básicos y transversales, que resultan importantes para muchos de los diferentes enfoques.

Agentes inteligentes

Los *agentes inteligentes* son programas capaces de percibir su entorno y, de acuerdo con éste, actuar de manera autónoma. Es importante señalar que no se entiende entorno en un sentido amplio. El entorno de un agente es definido por su capacidad de percepción, que implica que un teclado puede determinar todo lo que un agente percibe a su alrededor. Además, son agentes capaces de adaptarse a los cambios y de alcanzar los objetivos que se les planteen. Un cambio puede ser una nueva instrucción recibida o una señal física detectada por algún sensor. También se habla de *agentes racionales*, que se definen como agentes diseñados para buscar el mejor resultado según el problema y, en caso de incertidumbre, el mejor resultado esperado (Russell y Norvig, 2002).

En el contexto de la inteligencia artificial se pone especial énfasis en los agentes que demuestran cierto grado de *inteligencia*, por lo que se espera que puedan adaptarse al entorno, realizar sus propios planes de acción y aprender. Algunas características buscadas en los agentes son:

- *Autonomía.* Los agentes deben operar sin depender de otros. Además, deben controlar sus acciones y su estado interno.
- *Sociabilidad.* Los agentes deben poder interactuar con otros agentes o con humanos.
- *Respuesta.* Los agentes deben percibir el entorno y responder dinámicamente a los cambios que se presenten.

¹²⁴ Esta sección fue elaborada por Silvia Guardati.

- *Iniciativa*. Los agentes deben poder actuar no sólo como respuesta al entorno, sino también de manera proactiva.

Estructura de los agentes

Todo agente está formado por una parte física y una lógica. La primera es el conjunto de dispositivos físicos usados, como por ejemplo computadoras, sensores o actuadores. Con respecto a la parte lógica, son los programas que determinan la conducta del agente, ya que dichos programas controlan todas sus acciones. Ambas partes son importantes y están estrechamente relacionadas. Russel y Norvig (2002) presentan cuatro tipos básicos de programas, una clasificación que está basada en el tipo de conducta que se proporcionará al agente.

- *Agentes reactivos simples*. Este tipo de agentes actúa de acuerdo con las percepciones actuales, sin considerar las anteriores. Por tanto, es un tipo muy simple, ya que cada acción se decide sólo tomando en cuenta un conjunto limitado de datos, que son los correspondientes a la situación a la cual se enfrenta el agente en el momento.
- *Agentes reactivos que operan sobre la base de modelos*. En este tipo de programas se agrega un modelo del mundo en el cual actúa el agente. Es importante que el modelo contenga información sobre lo que sucede en el entorno –independientemente de lo que haga el agente– y, además, información sobre cómo afecta al entorno lo que hace el agente. Por tanto, la conducta del agente queda determinada por la situación y por el conocimiento que tenga acerca del mundo que lo rodea.
- *Agentes que operan sobre la base de objetivos*. Tienen metas que alcanzar, además del conocimiento sobre la situación y el modelo de su mundo. Por tanto, llevarán a cabo cada acción considerando toda la información disponible. Es decir, su misión es alcanzar la meta, pero para ello deberán tener en cuenta su situación y el entorno. Decidir de acuerdo con un objetivo puede ser una tarea compleja, cuando el mismo no es inmediato sino que es consecuencia de varias acciones encadenadas. En este caso intervienen operaciones de *búsqueda* y de *planificación*, ambas áreas de estudio de la inteligencia artificial.
- *Agentes que operan sobre la base de utilidad*. Este tipo de agentes es una variante del anterior, y la diferencia entre ellos radica en que éstos pueden *medir* el grado en el cual se alcanza el objetivo deseado. Para esto se establece una función de *utilidad*. Esta función juega un papel muy importante cuando existen objetivos conflictivos y cuando hay varios objetivos posibles. En el primer caso, la utilidad permite establecer un equilibrio entre las metas, y en el segundo seleccionar alguno de ellos.

Estos cuatro tipos de agentes pueden ser complementados con actividades de aprendizaje para aumentar su potencialidad y acercarlos más al concepto de *inteligentes*. Para lograr que los *agentes aprendan* se requiere incorporar algunos módulos

especiales. Uno de ellos permite que el agente pueda ir mejorando –para mejorar utiliza retroalimentación sobre su conducta– a medida que va aprendiendo. Otro módulo importante es el encargado de analizar nuevas alternativas y evaluarlas para así descubrir posibles mejoras a incorporar. Es decir, a medida que el agente actúa normalmente, de manera simultánea está intentando descubrir nuevas y mejores formas de hacer su tarea.

Aplicaciones de los agentes

Hoy día, existe una gran variedad de agentes inteligentes que interactúan con los usuarios de TIC diariamente. Los agentes ya aplicados pueden clasificarse en cuatro grandes grupos, de acuerdo con la actividad predominante que desempeñan. Estos son: agentes compradores, agentes personales, agentes de monitoreo y vigilancia, y agentes de minería de datos.

- *Agentes compradores.* Son agentes que asisten al comprador en todas las etapas del proceso de compra; por ejemplo, la búsqueda de información de productos o servicios, el asesoramiento sobre precios, y el envío, entre otras.
- *Agentes personales.* Son agentes inteligentes que llevan a cabo tareas en lugar de alguien; por ejemplo, revisar el correo electrónico, clasificarlo de acuerdo con algunos parámetros dados, buscar información a petición de un usuario, completar formularios electrónicos, jugar como oponente en juegos de computadoras, entre otras.
- *Agentes de monitoreo y vigilancia.* Son agentes encargados de observar y cuidar equipos o sistemas; por ejemplo, monitorear el uso de equipo y el acceso a la información, la planificación de tareas, entre otros.
- *Agentes de minería de datos.* Son agentes encargados de descubrir información dentro de repositorios, que generalmente son alimentados desde distintas fuentes. Los agentes buscan información que pueda ser útil para tomar decisiones o para ejecutar ciertas acciones.

En la sociedad de la información existen numerosas y muy útiles aplicaciones de los agentes, que sirven de apoyo en tareas digitales de procesamiento, distribución y almacenamiento de información; la administración de sistemas y redes es una de ellas. Esta es una de las primeras aplicaciones de los agentes inteligentes. Sin embargo, los agentes empleados en esta área no cuentan con todas las características de un agente inteligente, ya que trabajan bajo una asignación fija de funciones. A medida que la complejidad de los sistemas crece y que las redes ocupan un lugar más importante en las organizaciones, aparece un mayor campo de aplicación posible para los agentes inteligentes. A medida que la cantidad de información disponible aumenta –debido al auge de internet y a la digitalización de información– resulta necesario contar con ayuda para seleccionarla, organizarla, distribuirla y almacenarla. Los agentes inteligentes pueden apoyar a los usuarios a llevar a cabo estas actividades. En este sentido, los agentes desempeñan un papel de filtro para manejar la sobrecarga de información en

las redes digitales. Los agentes inteligentes ya son usados para priorizar y organizar el correo electrónico de acuerdo con los usuarios; actualmente se hace por medio de reglas que establece la persona interesada, y se prevé que cada vez más los agentes podrán deducir las reglas a partir del comportamiento del usuario –utilizando los patrones encontrados en él. Los agentes inteligentes cumplen dos funciones importantes más. A pesar de que el uso de computadoras se ha difundido notablemente en los últimos años, todavía hay usuarios que encuentran dificultades para su manejo. En primer lugar, capacitan al usuario, y en segundo lugar le ayudan en caso de presentarse algún problema.

Aprendizaje de máquina

El *aprendizaje de máquina* hace referencia a la capacidad de una máquina de aprender, lo cual se traduce como la capacidad de una máquina para cambiar –sobre la base de datos internos o externos– su estructura, sus programas o sus datos con el objetivo de lograr un mejor desempeño. Sin embargo, hay ciertos cambios –por ejemplo, agregar un registro a una base de datos– que no se asocian con el concepto de aprendizaje. Otros, por ejemplo programas para reconocimiento de voz que mejoran su desempeño, a medida que aumenta su uso –experiencia– se relacionan más fácilmente con el concepto que los humanos tenemos de aprendizaje.

La idea principal está fundamentada en procesos de aprendizaje humano. La manera más fácil y efectiva de enseñar a un niño a reconocer un automóvil consiste en mostrar una selección de varios tipos de automóviles al aprendiz. Como resultado, el niño aprende una combinación compleja de características que constituyen un automóvil. Si el niño fue presentado con un modelo basado en reglas de la clasificación para automóviles, esto contendría las reglas como: “Un auto tiene cuatro ruedas” y “un auto tiene entre 3 y 7 metros de longitud”. Un pequeño automóvil de 2 metros no sería reconocido como tal. Si el estudiante (sea niño o máquina) es capacitado con ejemplos, es muy probable que el aprendiz clasificaría también coches excepcionales con cinco ruedas como tal. Por tanto, este concepto aparece en áreas como los sistemas basados en conocimientos aplicados al diagnóstico o a la planificación, el reconocimiento de patrones, los agentes y la robótica, entre otras.

Mitchell (2006) define el aprendizaje de máquina de una manera muy clara: se dice que una máquina *aprende* con respecto a una cierta tarea T, una métrica de desempeño P y un tipo de experiencia E, si el sistema mejora su desempeño P en la tarea T aplicando la experiencia E. De acuerdo con la manera de especificar T, P y E la *acción de aprender* puede ser denominada de distintas maneras: minería de datos, actualización de bases de datos, programación por ejemplos, entre otras.

Tipos de aprendizaje

El tipo de aprendizaje se establece de acuerdo con la retroalimentación disponible al momento de llevar a cabo la actividad. De acuerdo con esto, se habla de:

1. *Aprendizaje supervisado*. Se aprende de acuerdo con una entrada y con una salida suministrada. Un típico caso de aprendizaje supervisado es la *clasificación*, para lo cual se provee a la máquina de un conjunto de ejemplos, en los que se distingue claramente que a ciertas entradas le suceden ciertas salidas. Por ejemplo, se proporcionan un conjunto de imágenes de frutas –entrada– y para cada una de esas imágenes se da el nombre correspondiente –salida. Una vez que el sistema *aprenda a reconocer frutas*, podrá clasificar las nuevas imágenes que reciba.
2. *Aprendizaje no supervisado*. Se aprende sólo a partir de ciertas entradas, ya que no se proporcionan salidas. Por tanto, la máquina debe aprender a producir una salida adecuada. Por ejemplo, se puede suministrar al sistema algunos datos sobre el clima y con ellos deberá poder determinar si es un buen día para salir a caminar o no.

A partir de estos tipos de aprendizaje se han desarrollado varios paradigmas. A continuación se presentan algunos de los más conocidos y utilizados hasta el momento. Los mismos se agrupan según correspondan a aprendizaje supervisado o no supervisado, respectivamente.

- 1.1 *Aprendizaje inductivo –supervisado*. Este paradigma es uno de los clásicos en el área del aprendizaje automatizado. Consiste en obtener nuevos conceptos, más generales, a partir de ejemplos. Para esto se provee al sistema de un conjunto de casos, positivos y negativos, previamente clasificados, y éste los utiliza para generar conocimiento más general que puede ser usado posteriormente. Existen varios algoritmos que trabajan bajo este enfoque, los más conocidos son los *árboles de decisión* y las *redes neuronales*. La principal limitación de este paradigma es que para funcionar de una manera adecuada requiere de numerosos ejemplos de capacitación, lo cual es difícil de conseguir en ciertos casos –considérese la dificultad de reunir muchos ejemplos con información sobre el fondo del mar.
- 1.2 *Aprendizaje que se produce sobre la base de explicaciones (Explanation-Based Learning, EBL) –supervisado*. Este paradigma intenta aprovechar el conocimiento del dominio que se tenga para mejorar la capacidad de aprender –de igual manera que los seres humanos utilizamos todo el conocimiento previamente adquirido en cualquier actividad nueva de aprendizaje que llevemos a cabo. Por tanto, se intenta utilizar la experiencia que se tenga en lugar de muchos ejemplos. Esa experiencia puede ser provista por medio de una descripción de alto nivel del concepto que debe aprender el sistema, de teoría del dominio y de algún ejemplo de capacitación. Con toda esta información, el sistema debe ser capaz de generalizar el concepto y aprender.
- 2.1 *Aprendizaje por refuerzo –no supervisado*. En este paradigma se aprende por medio de refuerzos –premios o castigos– de acuerdo con lo que se hace. Es decir, en vez de indicar qué hacer se va aprendiendo qué hacer a través de los refuerzos. En este tipo de aprendizaje se presume que existe un conocimien-

to del entorno; por ejemplo, puede ser un sistema legal al cual se le suministran ciertas entradas y éste produce una salida. Una vez conocida la solución real del caso, y que ésta es comparada con la proporcionada por el sistema, se pueden reforzar valores de atributos, reglas, y otros, de tal manera que el sistema aprenda y en su siguiente caso pueda mejorar su eficacia. Tiene varias ventajas sobre los otros paradigmas, y una de las principales es que no requiere ni ejemplos ni conocimiento del dominio. Otra ventaja es que el sistema va aprendiendo *en línea*, y por tanto mejora su desempeño a medida que aprende. La principal limitación de este paradigma es que es muy lento.

- 2.2 *Aprendizaje evolutivo –no supervisado*. Este paradigma se basa en los algoritmos genéticos. El aprendizaje empieza produciendo arbitrariamente una población inicial, en la cual cada individuo podría ser la solución de un problema. Posteriormente, cada uno de ellos es evaluado y se determina la calidad de la solución de acuerdo con el problema. Dependiendo del resultado se produce una *nueva generación* de soluciones y la anterior se desecha. El ciclo de evaluar y reproducir concluye cuando se alcanza algún criterio de terminación establecido inicialmente. Una de las ventajas más importantes que ofrece este tipo de aprendizaje es que no queda sujeto a un conjunto de criterios establecidos sino que los mismos pueden ir cambiando, a medida que el sistema va aprendiendo. La principal desventaja es que no permite implementar fácilmente el aprendizaje en línea; generalmente se requiere primero capacitar a los sistemas por medio de un simulador.

Aplicaciones del aprendizaje automático

Los algoritmos desarrollados para aprendizaje de máquina han sido empleados exitosamente en el diseño de robots autónomos –robots que deciden qué hacer de acuerdo con su experiencia–, en la programación de buscadores capaces de personalizar automáticamente el entorno de acuerdo con los intereses del usuario, en la minería de datos –aplicada a la medicina y en el área de las finanzas–, en el reconocimiento de voz y en visión por computadora. A continuación se presentan algunos casos interesantes (Mitchell, 2006):

- *Reconocimiento de voz*. Los sistemas comerciales¹²⁵ para reconocimiento de voz son capacitados mediante técnicas de aprendizaje de máquina. Esto se debe a que la precisión con la que trabajan estos sistemas es mejor si se los entrena que si se intenta programarlos. Muchos de estos sistemas tienen dos fases de aprendizaje: la primera de ellas es cuando se los entrena inicialmente,

¹²⁵ Para mayor información sobre algunos sistemas comerciales, consúltese:

<http://www.speechrecognition.philips.com/>,

<http://www.iglou.com/vrsky/>,

<http://www.apple.com/macosex/features/speech/>

http://www.microsoft.com/windowsxp/using/setup/expert/moskowitz_02september23.mspx

de manera independiente de quien los utilizará, y la segunda –una vez entregados los mismos– en la que se los prepara de acuerdo con las características propias del usuario.

- *Visión por computadora.* En los sistemas de visión por computadora también se utilizan las técnicas de aprendizaje para entrenar y así ganar mayor confiabilidad en las respuestas. Estos sistemas han sido aplicados en distintas áreas: reconocimiento de rostros, reconocimiento de imágenes –se recupera una determinada imagen dentro de un grupo de fotos–, seguimiento de pelotas –como apoyo de árbitros en partidos de tenis–, para clasificar frutas y verduras, entre otros.¹²⁶
- *Control de robots.* Los métodos de aprendizaje han sido usados en diferentes robots con el objetivo de lograr que éstos puedan actuar sin requerir de una programación previa explícita. En algunos casos, para que el robot adquiera estrategias de control, en otros para que aprenda a detectar y evitar obstáculos al aplicar experiencias previas.¹²⁷
- *Apoyo en el desarrollo de algunas ciencias.* Se utilizan métodos de aprendizaje como apoyo a procesos científicos que requieren el manejo de muchos datos; por ejemplo, en investigaciones orientadas a modelar expresiones de genes y a descubrir objetos astronómicos, entre otros.

La aplicación del aprendizaje de máquina se da especialmente en el desarrollo de programas dedicados a la solución de problemas muy complejos, para los cuales resulta difícil diseñar y programar un algoritmo. *Entrenar* un sistema para que reconozca una fruta en buen estado, resulta notoriamente *más fácil* que programarlo para que haga dicha tarea. También se utiliza el aprendizaje de máquina para tareas que requieren *adaptarse al entorno* en el cual van a operar. Un ejemplo de este tipo son los sistemas dedicados al reconocimiento de voz, los cuales usan los mecanismos de adaptación provistos por el aprendizaje para adecuarse al usuario que atenderán. En el mundo de internet los procesos de agentes que aprenden se aplican comúnmente para personalizar ciertos accesos a sitios, utilizar buscadores, o implementar medidas de seguridad, sólo por citar algunos casos.

Reconocimiento de patrones

Reconocimiento de patrones es un área dedicada a la investigación, diseño y desarrollo de sistemas que reconocen patrones dentro de un conjunto de datos. Para ello se apoya en otras actividades como la estimación de errores, las estadísticas o la inferencia. El reconocimiento de patrones implica la clasificación de datos sobre la base de conocimiento previamente almacenado o en inferencias estadísticas a partir de los

¹²⁶ Para obtener una lista importante de aplicaciones comerciales, consúltese: <http://www.cs.ubc.ca/spider/lowe/vision.html>

¹²⁷ Para mayor información, consúltese: <http://www.idsia.ch/~juergen/learningrobots.html>

mismos datos. Este campo de estudio de la inteligencia artificial está muy vinculado con el del aprendizaje; los sistemas de reconocimiento de patrones suelen entrenarse utilizando métodos de aprendizaje supervisado.

El ser humano realiza esta actividad de manera natural con sus sentidos y su cerebro. Es decir, primero percibe –por medio del tacto, la vista, el olfato o el oído– y luego reconoce el objeto en cuestión. Un sistema artificial que pueda percibir y posteriormente, de manera automática, categorizar objetos debe poder realizar estas dos actividades. Para ello se reemplazan los sentidos por sensores u otros medios de entrada de información y el cerebro por una computadora capaz de ejecutar algoritmos de clasificación. Sin embargo, la sustitución no es tan simple ni tan directa. Se presentan problemas de cuantificación, calificación y representación, que no son fáciles de resolver. Los conocimientos producidos en el área de aprendizaje de máquina han contribuido sustancialmente al desarrollo de esta disciplina, debido a que conocer cómo los humanos aprendemos, abstraemos, sintetizamos y resolvemos problemas ha sido el primer paso para automatizar estas actividades.

Generalmente, un sistema para el reconocimiento de patrones está formado por tres módulos. Uno de ellos está dedicado a recibir los datos –pueden representar imágenes, señales, palabras– que serán analizados. Otro está encargado de extraer las principales características de la información recibida. Por último, el tercero será el que hace la clasificación de acuerdo con las características obtenidas. El reconocimiento puede llevarse a cabo según distintos enfoques, y los más conocidos son el *estadístico* y el *estructural*. El primero de ellos se basa en la teoría de probabilidad y estadística; además, supone la existencia de un conjunto de medidas numéricas con distribuciones de probabilidad conocida. Por otro lado, la clasificación estructural se basa en las relaciones que pudieran tener los objetos de interés, es decir, se construye un lenguaje que pueda describir la estructura del conjunto de objetos estudiado.

Son muchas las áreas en las que puede aplicarse el reconocimiento de patrones. Algunas de las más importantes son: análisis de imágenes; identificación de personas, como es comúnmente utilizado en los controles fronterizos en aeropuertos; ubicación de animales dentro de granjas; inspección industrial; diagnóstico aplicado a personas y a equipos; control de calidad y de originalidad de productos, entre otros. Mediante el reconocimiento de patrones, los documentos recibidos por internet pueden clasificarse en documentos deseados o no deseados (*spam*). Existen empresas dedicadas a la aplicación del reconocimiento de patrones en el desarrollo de sistemas usados para investigar, analizar y visualizar datos biomédicos.¹²⁸ Aprovechando el reconocimiento de patrones, métodos de aprendizaje y visión –sólo por citar algunas de las áreas involucradas– se han desarrollado sistemas capaces de interpretar textos escritos a mano. Estos sistemas¹²⁹ se utilizan en los servicios postales de Estados Unidos, el Reino Unido y Australia para clasificar la correspondencia de acuerdo con las direcciones escritas por los usuarios.

¹²⁸ Para mayor información consúltese: http://ibd.nrc-cnrc.gc.ca/research/biomedical_informatics/1_pattern_recognition_e.html

¹²⁹ Para mayor información consúltese: http://www.cedar.buffalo.edu/hwai/hwai_home.html

Robótica

La *robótica* es el área encargada del estudio, diseño y construcción de robots. En la robótica se utiliza el conocimiento producido en diversas ciencias y tecnologías, entre las que se destacan la mecánica, la electrónica, el álgebra, la computación y las comunicaciones. Por su parte, un *robot* puede ser definido como una máquina programable capaz de realizar ciertas tareas automáticamente. Por lo general, se utiliza el término robot independientemente de la manera en la que fue elaborado: por medios mecánicos o por la acción de un agente artificial. Sin embargo, cualquiera sea la forma adoptada, el robot comparte las características de ser creado por el hombre o por máquinas y de ser programable.

A pesar de que existen varias definiciones del término robot, los investigadores parecen coincidir en que los mismos deben poder realizar algunas actividades, como manipular objetos dentro de su ambiente, moverse en uno o más ejes, realizar movimientos coordinados, demostrar cierto grado de *inteligencia* por medio de operaciones como la toma de decisiones y el control automático.

Los avances logrados en esta disciplina son muy alentadores, aunque todavía quedan muchas áreas de oportunidades. Las contribuciones de la inteligencia artificial en general –y en particular de las áreas de visión, aprendizaje automático y reconocimiento de patrones– son muy valiosas en el intento por lograr la creación de máquinas que realicen tareas *normales* para un ser humano, como por ejemplo desplazarse en un cierto ambiente, encontrar y manipular objetos de diferentes tamaños, formas y colores, o tomar decisiones.

De acuerdo con lo esperado como resultado, la robótica puede clasificarse en a) *robótica autónoma*, que es el área encargada de desarrollar robots capaces de actuar sin intervención humana; el robot debe ser capaz de reconocer su entorno, reaccionar de acuerdo con él y poder llevar a cabo las tareas asignadas. Y b), *robótica evolutiva*, que es el área encargada de desarrollar robots capaces de evolucionar de acuerdo con su entorno –no requieren un entorno estructurado, previamente conocido. En este tipo de robótica se usan redes neuronales y algoritmos genéticos –otros de los campos de estudio de la inteligencia artificial.

La robótica es un área muy difundida y aceptada, y por tanto sus aplicaciones son muy variadas. Es posible encontrar robots como apoyo en casi cualquier actividad desarrollada por el hombre. Un aspecto a destacar es que los robots conjugan gran parte del conocimiento producido en el área de la inteligencia artificial, especialmente de los campos de estudio mencionados en esta sección. La *industria* es quizás el área más favorecida por esta tecnología, ya que se ofrece una gran variedad de robots, diseñados para desarrollar tareas específicas. Algunos ejemplos¹³⁰ de estas tareas son: soldar –con casi todas las variantes posibles–, pintar, manejar materiales, empaquetar, desplazar piezas, cortar, limpiar, entre otras. Otro caso exitoso de apli-

¹³⁰ Para obtener una lista más completa de robots orientados a tareas, consúltese: <http://www.robots.com/applications.php>

cación es la *agricultura*. En esta área se han desarrollado robots para controlar vehículos –dedicados a las tareas propias del trabajo rural–, recolectar y seleccionar productos, fumigar, y otras funciones. Según informes de la NASA, este organismo ha utilizado robots para operar en el espacio.¹³¹ En la agencia espacial estadounidense se mantiene un programa muy amplio de investigación y desarrollo en robótica. Sus aplicaciones incluyen control de vehículos, vuelo y aterrizaje, construcción y funciones militares, sólo por citar algunos ejemplos.

5. El término *inteligencia artificial* es objeto de polémica

Los resultados alcanzados por una disciplina joven como la *inteligencia artificial* en sólo cincuenta años son evidentes y sorprendentes. Pero, probablemente debido también a estos avances rápidos, la IA ha adquirido de alguna forma una reputación un tanto sombría. Minsky (1990) señala que cada vez que se hizo un descubrimiento útil, la investigación o el producto por lo general se desarrolló bajo un nuevo campo científico o producto comercial. Así surgieron ámbitos como la robótica, lingüística computacional, visión artificial, reconocimiento de patrones, ingeniería del conocimiento, traducción automática, minería de datos, descubrimiento en base de datos, entre otros. Esto explica por qué se observan tan pocos avances en la disciplina central de IA y tantos en los campos derivados de la inteligencia artificial.

Por otra parte, es importante observar que el nombre *inteligencia artificial* utilizado para describir la disciplina, y más precisamente *la idea de crear artefactos o máquinas inteligentes*, ha originado continuas e innumerables críticas al área. Hubo filósofos antes que computadoras, y éstos intentaron resolver muchos de los problemas de los cuales tanto los investigadores de IA como de las ciencias cognitivas y neurociencias, afirman ser su objeto de estudio (Russell y Norvig, 2002): *¿podemos entender cómo funciona el cerebro?, ¿es posible que los seres no humanos tengan intelecto?* Estos cuestionamientos han dado origen a innumerables y acalorados debates, principalmente entre filósofos –no los analíticos– y hombres de ciencia en general. A pesar del surgimiento de una industria multimillonaria y de aplicaciones que afectan la vida de muchas personas todos los días, Dreyfus (1992) abiertamente ha señalado que “*excepto para unos cuantos empecinados, es para todos evidente que la empresa de crear inteligencia ha fracasado*”. Sayre (1993) mencionó que “*la inteligencia artificial no tiene la más remota posibilidad de producir resultados verdaderos*”.

¿Pero qué es lo que se cuestiona en realidad? No parece que se discutan los productos desarrollados con tecnología de IA. Nadie se pronuncia en contra de los robots *Spirit* y *Opportunity* que recorren Marte, ni en contra del agente que ayuda al usuario de comercio electrónico a identificar los libros más adecuados para su gusto personal, ni en contra de los controladores aéreos inteligentes de los aeropuertos más importantes del mundo, ni tampoco en contra del jumbo 747-400 que puede despegar y

¹³¹ Una lista de las aplicaciones puede consultarse en: <http://www-robotics.jpl.nasa.gov/applications/index.cfm>

aterrizar en forma autónoma. El origen de la polémica parece estar en el *significado* de la palabra *inteligencia*, *si se puede o no crear inteligencia en máquinas, si las máquinas pueden o podrán pensar, si finalmente tendremos personas artificiales*. Además, el significado e interpretación de las palabras indudablemente ha acentuado la controversia, como por ejemplo estas dos preguntas formuladas por Russell y Norvig (2002): *¿Son capaces de volar las máquinas? ¿Son capaces de nadar las máquinas?*

Recuadro 13.2

LA CONCIENCIA Y LA MENTE SON PRODUCTOS DEL CEREBRO

La mayoría de los investigadores de neurobiología, filosofía, psicología y ciencias cognitivas no consideraba a la *conciencia* como un tema de investigación científica unos años atrás. Generalmente se veía a la conciencia como algo místico, abstracto, tabú, y prematuro de estudiar en esos momentos. Las cosas, sin embargo, han ido cambiando en los últimos años, básicamente por la madurez de algunas ciencias que tratan con problemas del cerebro y la mente. En la actualidad, la mayoría de los neurocientíficos y algunos filósofos están de acuerdo en que la inteligencia, la conciencia y otros fenómenos mentales son producto del sistema físico de neuronas y sus respectivas células y estructuras de apoyo y, por tanto, *producto del cerebro*.

A menudo se cita la idea del experimento de la prótesis cerebral que está asociado tanto al trabajo del filósofo John Searle como del investigador robótico Hans Moravec y recientemente ha sido difundido por Kurzweil. El experimento consiste en lo siguiente: “Consideremos que los avances de la neurofisiología son tales que permiten comprender tanto la entrada y salida, como la conectividad de todas las neuronas del cerebro. Supongamos también que somos capaces de construir dispositivos electrónicos microscópicos capaces de imitar la conducta de estas neuronas y conectarlas en el tejido neuronal. El experimento consiste en reemplazar gradualmente todas las neuronas del cerebro por estos dispositivos electrónicos y luego invertir el proceso para devolver al sujeto a su estado biológico normal”.

El punto de discusión del experimento radica en lo que sucederá con la conciencia del individuo, sus experiencias internas y externas, durante la operación y después de ésta. Existen, obviamente, enfoques intuitivos diferentes. Moravec, con un punto de vista *funcionalista*, sostiene que la conciencia del individuo no se vería afectada porque la única propiedad significativa de las neuronas es su conducta de entrada y salida. Searle, en cambio, señala que la conciencia del individuo se esfumaría, pero su conducta observable continuaría siendo la misma. El suyo, para este problema en particular, es un punto de vista *epifenómico*, en el sentido de que algo ocurre pero sin repercusiones en el mundo observable. En realidad, el debate de este experimento no radica en determinar si en el futuro tendremos cerebros artificiales o no, sino si este tipo de cerebros tendrá conciencia.

(Continúa)

Recuadro 13.2 (Continuación)

La palabra *conciencia* se ha utilizado durante años de distintas maneras y, a veces, incluso, hasta para expresar ideas completamente diferentes. Existen dos posiciones en el estudio de la conciencia y la mente que polarizan gran parte del debate actual en círculos científicos y filosóficos. Searle, en un intento por analizar las implicaciones psicológicas y filosóficas relacionadas a los esfuerzos por simular en una computadora las capacidades cognitivas humanas, consideró útil distinguir entre lo que él llama, *inteligencia artificial débil* (*weak AI*) e *inteligencia artificial fuerte* (*strong AI*). De acuerdo con una IA débil, el principal valor de una computadora en el estudio de la mente es que proporciona una herramienta muy valiosa. Por otra parte, desde la perspectiva de una IA fuerte, la computadora no se puede considerar como una herramienta en el estudio de la mente, sino que es la mente. En otras palabras, *inteligencia artificial fuerte* sostiene que la mente humana será reproducible por medios artificiales, y que las máquinas, en el futuro próximo, podrán pensar y serán conscientes de sus acciones. La *inteligencia artificial débil* sostiene que la máquina sólo podrá imitar una *conducta* o simular la mente humana, pero nunca podrá *pensar, sentir* y ser *consciente* de sus acciones.

John Searle señala que no tiene objeciones con una IA débil; su discusión y sus argumentos están dirigidos a una IA fuerte, en el sentido que los programas –desde esta perspectiva– serán estados cognitivos que podrán explicar la cognición humana. Searle dice que, en todo caso, los programas realizarán funciones, pero nunca podrán comprender. Los defensores de la *inteligencia artificial fuerte* siempre esgrimen argumentos en defensa de su posición. Sin embargo, esos argumentos, muchas veces, quedan prácticamente supeditados a la interpretación y significado que le damos a las palabras. Por ejemplo, si la puerta de un auto se abre cuando llega su dueño, algunos podrán sostener que el auto comprende, reconoce a su dueño y por eso le abre la puerta. Otros, en cambio, sostendrán que es una celda fotoeléctrica la encargada de abrir la puerta luego de un reconocimiento de patrones, y que el auto no entiende ni comprende nada.

Fuentes:

Damasio, A. 1999. *The Feeling of What Happens. Body and Emotion in the Making of Consciousness*, Nueva York, Harcourt Brace.

Crick, F. y C. Koch, 1998., “Consciousness and neuroscience”, *Cerebral Cortex*, vol. 8, N° 2, Nueva York, Oxford University Press.

Searle, J. 1980, “Minds, brains and programs”, *Behavioral and Brain Science*, vol. 3, N° 3, Cambridge, Massachusetts, Cambridge University Press (en línea) <http://members.aol.com/NeoNoetics/MindsBrainsPrograms.html>.

———. 1999, *Mind, Language and Society: Philosophy in the Real World*, Londres, Phoenix.

Moravec, H. 1988. *Mind Children: the Future of Robot and Human Intelligence*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press.

Kurzweil, Ray. 1992. *The Age of Intelligent Machines*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press.

———. 2005. *The Singularity is Near: When Humans Transcend Biology*, Northampton, Viking Press.

Russell, S. y P. Norvig. 2002. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, Englewood.

Si los lectores tuvieran que responder la primera pregunta, seguramente se llegaría rápidamente a un consenso; contestarían que *las máquinas pueden volar*, ya que los aviones, los aeroplanos y los helicópteros vuelan. Si el mismo público fuera en cambio consultado sobre la segunda pregunta, también se llegaría seguramente a un consenso, pero la respuesta sería negativa; todos responderían que *las máquinas no pueden nadar*. Los barcos, las lanchas, los submarinos se desplazan en el agua de alguna forma, pero no con la acción que nosotros los humanos asociamos a la actividad de nadar.

Es muy importante observar que estas respuestas opuestas se obtienen por la *interpretación y significado* que le damos a las palabras *volar* y *nadar*, respectivamente. En general, consideramos que, prácticamente cualquier cosa que se desplaza por el espacio, *vuela*. A la natación, en cambio, la asociamos con desplazamientos en el agua, con las extremidades del cuerpo y sin tocar el piso. La acción de nadar, indudablemente, tiene más restricciones que la acción de volar. Además, es importante considerar en este análisis que ni las preguntas ni las respuestas tienen alguna relevancia en la vida de los ingenieros aeronáuticos y navales, quienes se dedican al diseño y construcción de máquinas cada vez más seguras, más eficientes y más veloces. Es difícil que un ingeniero naval se pregunte si los barcos nadan o no, o un ingeniero aeronáutico si los aviones vuelan o no. Lo mismo ocurre con los científicos dedicados a la inteligencia artificial. Los investigadores de la NASA que enviaron los robots geológicos a Marte, difícilmente se pregunten si éstos *piensan* o no, si son *inteligentes* o no. Russell y Norvig (2002) señalan acertadamente en su libro de texto que “*la posibilidad de la existencia de máquinas pensantes ha estado presente entre nosotros unos cuarenta años, no lo suficiente como para que los hombres se pongan de acuerdo sobre el sentido y significado de la palabra pensar*”.

Finalmente, es importante señalar que mientras no se encuentren respuestas a todas estas interrogantes o se precisen los significados de los términos utilizados, la misma naturaleza de la filosofía propiciará que este debate se prolongue y sea irresoluble durante varios años.

6. Aplicaciones de la IA

La inteligencia artificial, indudablemente, forma parte ya de la vida diaria de las sociedades de la información. La IA ayuda a las personas prácticamente en todos los campos: hacer mejor uso de la información, trabajar y vivir mejor, y en general tratar de hacer la vida más fácil, atractiva y estimulante. La inteligencia artificial es de fundamental importancia para dirigir y enfocar la información de las redes digitales, para organizar los datos y la información captada por sensores, y para superar las barreras enormes de comunicación causadas por ciertas discapacidades físicas, las diferencias de lenguaje y las desigualdades de conocimiento. Las aplicaciones de la IA están influyendo en todas las demás operaciones básicas de información, en particular, el (I) almacenamiento de información, (II) la transmisión de información, naturalmente también el (III) procesamiento de información y (IV) su captación, despliegue e interoperación.

Para demostrar la ubicuidad de la IA, se presentan algunas aplicaciones que incorporan todas las diferentes operaciones básicas de las TIC.

- *Quioscos inteligentes –SmartKiosk– (IV)*. La IA ha desarrollado un nuevo producto que permite la comunicación personal entre un individuo y una máquina. La comunicación natural es simple y directa mediante la voz, la imagen –gestos, expresión facial, expresión corporal– y en varios idiomas. Las aplicaciones son múltiples: se pueden instalar en diferentes puntos de la ciudad, para asesorar sobre medios de transporte, museos, espectáculos, ubicación y localización de múltiples edificios públicos y privados, entre otras. Los quioscos inteligentes seguramente se desarrollarán también en forma virtual, y por internet u otros medios –teléfonos celulares– se podrá tener acceso a ellos.
- *Detectores de identificación por radio frecuencia (radio-frequency identification detectors, RFID) (Hoag y Thompson, 2006) (II, III)*. En estos detectores se utiliza una tecnología de identificación automática que depende de etiquetas –transponders– que se adjuntan a individuos u objetos –como contenedores, vehículos, mascotas, o bolsos– y que un mecanismo lector puede seguir o monitorear. Los RFID tienen múltiples aplicaciones: actualmente son utilizados en tarjetas ID para monitorear –seguir la huella– a los empleados de una empresa; en tarjetas prepagas para registrar los pagos –deducir del monto total– de los conductores en casetas de peaje; para seguir la ruta de contenedores después del desembarco, y otras. Si bien la herramienta no está directamente relacionada a la IA, muchos de sus usos y aplicaciones sí lo están. En los próximos años se observará una gran cantidad de sistemas que harán uso de los detectores RFID y que convivirán con el ser humano en la sociedad del conocimiento y con artefactos inteligentes. Se prevé que sustituirán a los códigos de barras, ya que pueden ser leídos a través de señales de radio, incluso a través de cajas o contenedores.
- *Sistemas de posicionamiento global (global positioning systems, GPS) (II, III, IV)*. Permiten calcular la posición exacta de un objeto o un individuo en el mundo entero. En 2006, estos dispositivos ya fueron incorporados a automóviles y teléfonos celulares. Sistemas inteligentes asociados al GPS podrán realizar una gran cantidad de actividades, desde el cálculo de trayectorias óptimas teniendo en cuenta el tráfico, hasta informes automáticos de accidentes en carreteras o de vehículos robados a la empresa donde se contrató el servicio, a ambulancias, estaciones de policía, y otras.
- *IBM desarrolló la nueva BlueGene/L (I, II, III, IV)*. La máquina se encuentra instalada en el Lawrence Livermore National Laboratory del Departamento de Energía de Estados Unidos, en Livermore, California. BlueGene actualmente es la computadora más veloz sobre la Tierra, y ha alcanzado velocidades de 280,6 teraflops –billones de cálculos por segundo. Este tipo de máquinas permitirán desarrollar aplicaciones prácticamente imprevistas hasta la fecha.
- *Robots humanoides (I, II, III, IV)*. Estas máquinas serán la solución para todos aquellos individuos que requieren algún tipo de atención especial. Los robots

podrían dialogar con ellos, leerles libros, administrarles medicamentos, seguir instrucciones, ser su compañía. Los robots y su futuro son muy importantes, porque prácticamente todos los campos de la IA convergen en la robótica. En el recuadro se describen brevemente productos de las empresas más importantes que se encuentran disponibles en el mercado.

Recuadro 13.3

AVANCES EN ROBOTS HUMANOIDES

Sony: Qrio. La empresa Sony presentó el primer robot *humanoide* de 60 cm de altura, que es capaz de correr. Toshi Doi, vicepresidente de Sony, señaló que el robot, que puede trotar a una velocidad de 14 metros por minuto, 0,84 km/h, también tiene capacidad para bailar. Puede efectuar 1.000 movimientos diferentes, danzar al ritmo de 10 canciones, utilizar 20.000 palabras y hablar con su propietario gracias a 200 diálogos preprogramados. Hasta el momento los robots humanoides necesitaban tener uno de los pies en el suelo para no perder la estabilidad. Sin embargo, con la tecnología *intelligent servo actuator* que le permite andar dinámicamente y la técnica *zero moment point*, que le permite mantener la estabilidad, este robot es capaz de bailar y correr.

Fujitsu: HOAP-3. Este nuevo modelo –año 2005– tiene 60 cm de altura y pesa 8,8 kg. Su cerebro puede procesar los sonidos e imágenes que recibe y actuar en respuesta a ellos. *Fujitsu Automation* considera que podrán vender unos 100 robots de este tipo en los próximos años.

Mitsubishi: Wakamaru. Este es un robot amarillo de 1 m de alto y 30 kg de peso, que reconoce perfectamente a sus dueños, así como a otras ocho personas, y utiliza más de 1.000 palabras para comunicarse. Incluso puede pedir cita con el médico o ayuda en caso de urgencia. Su único problema, como el de la mayoría de los robots, es que sólo comprende las frases con las que se le ha programado y no se puede cambiar el orden de las palabras.

Honda: ASIMO. Con el aspecto físico de un pequeño astronauta, este nuevo robot que sorprende por sus facultades, tiene 52 kg de peso y 1,20 m de altura. Dotado de una gran flexibilidad gracias a las 26 articulaciones de su cuerpo, puede reproducir el desplazamiento natural de los seres humanos, girar, bajar escaleras, pulsar interruptores, abrir puertas o trabajar en mesas, ya que sus ojos están situados al nivel de la visión horizontal de un adulto sentado. Es también capaz de reconocer seres humanos, objetos, gestos, voces y sonidos, realizar 50 saludos diferentes y actuar sobre la base de cualquiera de las 30 instrucciones que reconoce. Además, en la compañía Honda hay interés por desarrollar su capacidad para relacionarse con la gente. En su última versión, *ASIMO* presta servicios como recepcionista en nueve empresas, entre ellas IBM.

(Continúa)

Recuadro 13.3 (Continuación)

Toyota: Partner Robot. La empresa Toyota ha diseñado tres diferentes tipos de robots para la ayuda o asistencia a adultos mayores. Entre las principales características de estos robots se destacan su agilidad, amabilidad y un nivel de inteligencia suficiente como para poder operar y manipular dispositivos de uso corriente. El robot capaz de caminar está enfocado a la asistencia a personas y al cuidado de los ancianos. Este modelo mide 1,20 m de alto y pesa 35 kg. El segundo modelo tiene su fortaleza en la manipulación de objetos. Posee una estatura de un 1 m y pesa 35 kg. El tercer modelo fue diseñado para poder transportar individuos, por tanto puede ayudar en tareas de movilidad y asistencia a discapacitados. Es el más grande de la línea, mide 1,80 m de alto y tiene un peso de 75 kg. Cabe señalar que los dos primeros modelos están dotados de labios artificiales que se mueven, prácticamente, de la misma manera que los labios humanos, lo que les permite, junto con las capacidades de sus manos, tocar instrumentos musicales de aire como una trompeta.

- Proyecto denominado *Global Environment for Networking Investigations* GENI (entorno integral para entrelazar investigaciones) (II, IV). La National Science Foundation (Fundación Nacional para la Ciencia) de Estados Unidos está patrocinando un proyecto para rediseñar la próxima generación de internet. El proyecto GENI se enfocará en la seguridad, el incremento de tráfico esperado para los próximos años, y la entrega bajo demanda, como video y otros proyectos de gran escala. Además, esta nueva red permitirá la conexión a fuentes como teléfonos celulares y tipos GPS/Rfid y mayores facilidades, que redundará en la realización de nuevas aplicaciones de IA relativas a las tecnologías de la información y de las comunicaciones.
- *Pasaportes y documentos inteligentes* (I, II, III, IV). Los pasaportes podrán ser equipados con pequeñas tarjetas inteligentes, RFID, y se desarrollarán sistemas inteligentes para su administración.
- *Educación inteligente a distancia* (I, II, III, IV). La educación se transformará por los avances en la IA y en las TIC. Una persona ubicada prácticamente en cualquier lugar del planeta tendrá acceso a diferentes medios educativos automáticos, sin necesidad de tratar con un tutor humano. El uso de máquinas para capacitar personas en habilidades básicas y específicas representa una gran oportunidad para abordar un antiguo problema del desarrollo.

14. ALMACENAMIENTO DE INFORMACIÓN¹³²

Desde el comienzo de la producción de símbolos externos por parte de la humanidad, ha cobrado importancia el tema de dónde guardar la información y conservarla para su posterior uso. Como se ha visto anteriormente, también la computación depende de forma inseparable del almacenamiento de información, dado que el diseño de una máquina de Turing requiere una memoria entre las manipulaciones de símbolos. Con el crecimiento de redes de comunicación, la disponibilidad y la seguridad en los medios de almacenamiento juegan un papel fundamental, ya que no alcanza con poder guardar los datos. Éstos deben estar siempre disponibles y protegidos de posibles malos usos o de pérdidas causadas por accidentes. En este capítulo se presenta el almacenamiento de información, como uno de los subsistemas esenciales de las TIC. Se analizan los principales medios de almacenamiento, así como la evolución de los mismos a través del tiempo y algunas tendencias.

a. Diferentes tipos de memoria para fines diversos

El *almacenamiento* de información cumple el rol de una memoria y tiene que ver con los medios y métodos utilizados para guardar datos, es decir información, suponiendo que estos datos tengan algún significado. Éstos podrán emplearse repetidamente o sólo de forma esporádica, en un tiempo cercano o dentro de un período más prolongado, muchas o pocas veces. Es decir, de acuerdo con la naturaleza de lo que se esté almacenando y con su posible uso, se determina el método y el dispositivo más apropiado para su conservación y usos posteriores.

Dentro del campo de las TIC se distinguen dos tipos de almacenamientos o memorias, *el primario* o *memoria principal* y *el secundario, terciario* o *memoria auxiliar* (Tannenbaum, 2001). Para procesar datos, las computadoras se apoyan en la *memoria principal* o *almacenamiento primario*. Esta memoria se encarga de almacenar todos

¹³² Este capítulo ha sido elaborado por Silvia Guardati y Osvlado Cairó del Departamento Académico de Computación - Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM).

los datos involucrados en el procesamiento que se está llevando a cabo. Una característica importante de este tipo de memorias es que son volátiles, es decir se borran –pierden la información– en cuanto se interrumpe la energía. Las memorias RAM (*random access memory*) son memorias principales, formadas por circuitos integrados, se caracterizan por ser las más veloces pero también las más caras. Por otra parte, las computadoras y otros dispositivos, por ejemplo cámaras fotográficas, requieren de memorias capaces de guardar cierta información crítica, por ejemplo la necesaria para el arranque del equipo, de manera permanente. Las memorias adecuadas para este tipo de uso son las memorias ROM (*read only memory*), las cuales son no volátiles.

La *memoria secundaria, terciaria o auxiliar* almacena información que no está siendo procesada, pero que requiere conservarse para su posterior uso o como copia de seguridad o respaldo. Es una memoria no volátil, lo cual implica que la información no se borra cuando se interrumpe el suministro de energía. Se utiliza para guardar datos, programas y resultados obtenidos. Los dispositivos usados como memoria secundaria más comunes son los medios magnéticos. Las principales ventajas son que tienen una gran capacidad de almacenamiento, son confiables y permiten el acceso directo a los datos. Dentro de los medios magnéticos se destacan los discos: *diskette* o *floppy disk* –tamaño $5^{1/4}$ y $3^{1/2}$, ambos prácticamente fuera de uso–, Zip, y discos duros (*hard disk*). Estos últimos consisten en uno o más discos metálicos guardados en un compartimiento, generalmente adentro de la computadora –aunque existen versiones removibles. Además de los discos también se encuentran las cintas magnéticas; estas tienen una gran capacidad de almacenamiento, son más baratas, pero son mucho más lentas, ya que no permiten el acceso directo. En las grandes empresas se utilizan cintas magnéticas para realizar respaldos de las operaciones al finalizar el día, la semana y el mes. De esta manera se minimiza la pérdida de información cuando el sistema tiene alguna falla.

Además de los medios magnéticos, actualmente son muy utilizados los medios ópticos. Entre ellos se pueden mencionar los discos conocidos como CD (*compact disk*) y los DVD (*digital versatile disk*), y tecnología más reciente como los discos HD-DVD (*high definition-digital versatile disk*), *Blu-ray* y UDO (*ultra density optical*). Estos discos funcionan con luz, concretamente con rayos de luz láser y pueden fabricarse con distintos materiales; el más común es el policarbonato. Almacenan información en formato digital, es decir, como 1 y 0, que se producen según el disco absorba o refleje la luz; los datos se almacenan sobre una capa adentro del policarbonato. Alternativas más recientes de almacenamiento secundario y terciario son las memorias *flash*, y las memorias constituidas sobre la base de nanotecnología o proteínas, que se presentarán con mayor detalle en otras secciones.

Independientemente del medio de almacenamiento utilizado, se le debe prestar especial atención a la *administración del riesgo* y a la *seguridad* de la información almacenada. El primero de estos aspectos permite que las personas y las organizaciones cuantifiquen la importancia de sus datos y puedan establecer prioridades de protección entre ellos, ya que según esas prioridades se invertirá en distintos niveles de seguridad; la información que se clasifica como poco significativa para la empresa –su pérdida no causa gran perjuicio– no justifica invertir demasiado en su seguridad. Por

el contrario, si la información fue clasificada como muy significativa, entonces se justificará una gran inversión para protegerla. Por tanto, la seguridad depende de la administración del riesgo que se tenga. En relación con la seguridad se identifican algunos conceptos que deben considerarse (Dwivedi, 2006): autenticación, autorización, auditorías, integridad, encriptación y disponibilidad, todos ellos orientados a resguardar la información, de acuerdo con la administración del riesgo que se implemente.

1. *Memorias inmersas*

Actualmente existen numerosos tipos de memorias que pueden formar parte de las computadoras y de otros dispositivos que requieren de ellas para su operación, como por ejemplo cámaras fotográficas, cámaras de video y teléfonos celulares (Tanenbaum, 2001). En esta sección se presenta una introducción a las más utilizadas, clasificadas de acuerdo con una de las principales características, la volatilidad o no de las mismas (Barr, 2001). En el cuadro se presenta un esquema de esta clasificación.

Memorias RAM

Las memorias RAM (*random access memory*) se utilizan para el almacenamiento de datos dentro de una computadora u otro dispositivo. Están formadas por circuitos integrados que permiten guardar información a la cual se tendrá acceso en cualquier orden, y no requiere el movimiento del medio utilizado ni el uso de cabezales lectores. Esto es importante si se recuerda que el diseño de una máquina de Turing requiere la lectura de información desde una memoria. El término aleatorio –*random*, en inglés– hace referencia a que el acceso a los datos siempre consume la misma cantidad de tiempo, independientemente de su localización.

Dentro de las memorias RAM se distinguen dos categorías, las *SRAM* (*static RAM*) y las *DRAM* (*dynamic RAM*), y la principal diferencia entre ellas es el tiempo de permanencia de la información que almacenan. En las SRAM los datos perduran mientras se suministre energía, es decir, en caso de que la energía se interrumpa –temporal o permanentemente– la información se pierde. Por otro lado, en las DRAM los datos se mantienen por períodos de tiempo muy cortos, aunque la memoria siga reci-

Cuadro 14.1

CLASIFICACIÓN DE LAS MEMORIAS INTEGRADAS A DISPOSITIVOS

Memorias							
RAM		ROM			Híbridas		
SRAM	DRAM	De máscara	PROM	EPROM	EEPROM	Flash	NVRAM

biendo energía. Para que las DRAM puedan ser tan útiles como las SRAM requieren del uso de un *controlador*, que se encarga de *actualizar* periódicamente la información almacenada en la memoria. Con respecto al costo y al tiempo de acceso, las SRAM son más caras pero mucho más veloces y requieren menos energía que las DRAM. Otras diferencias entre estos dos tipos de memorias son que las SRAM son más fáciles de controlar, pero permiten menos densidad de almacenamiento que las DRAM. Por tanto, la elección dependerá de la cantidad de memoria requerida y de qué tan importante sean la velocidad de acceso y el consumo de energía. En algunos sistemas se utilizan de forma combinada, una cantidad pequeña de SRAM para la información más crítica y bloques más grandes de DRAM para todo lo demás. A su vez, tanto las SRAM como las DRAM pueden dividirse en subgrupos, según el funcionamiento y los modos de acceso de las mismas, respectivamente.

Memorias ROM

Las memorias ROM (*read only memory*) suelen utilizarse para almacenar la configuración del sistema y el programa de arranque en las computadoras y en otros dispositivos electrónicos. Son memorias no volátiles, es decir que no se pierde la información en cuanto se interrumpe la energía. Las memorias de este grupo se diferencian entre sí por los métodos usados para escribir información en ellas y por el número de veces que se pueden reescribir.

Las primeras ROM fueron dispositivos alambrados, o físicamente programados. Las especificaciones debían darse antes de desarrollar el circuito integrado para poder acomodar los transistores dentro del circuito, logrando así la programación deseada. Este tipo de memorias sigue vigente debido a su bajo costo, y actualmente se las denomina *de máscara* para diferenciarlas de las ROM programables.

Otro tipo de ROM son las *PROM* (*programmable ROM*), que se producen sin programar y luego, utilizando un dispositivo especial para ello, se le escribe la información requerida, palabra a palabra, por medio de cargas eléctricas. Una vez programada, ya no es posible cambiar los datos; si alguno de los datos almacenados debe ser modificado, esto implicará deshacerse de toda la memoria.

Finalmente, las *EPROM* (*erasable and programmable ROM*) son una variante más costosa de las PROM, y tienen la ventaja de que pueden ser borradas y reprogramadas. Para borrarlas se utiliza luz ultravioleta, que las deja en su estado original, listas para su programación. Un inconveniente que presentan es que para borrarlas y reprogramarlas deben ser extraídas del circuito.

Memorias híbridas

A medida que la tecnología ha avanzado, han surgido tipos de memorias que combinan características de las dos que se han presentado, por tanto se analizan como una categoría aparte. En general, estas memorias pueden ser leídas y escritas, como las RAM, según las necesidades, y mantienen la información, como las ROM, independientemente del suministro de energía.

Las *EEPROM* (*electrically erasable and programmable ROM*) son derivadas de las memorias EPROM. La principal diferencia es que se borran por medio de la electricidad, en vez de con la aplicación de luz ultravioleta. El borrado y la reescritura se hace *byte por byte* y ambas operaciones pueden llevarse a cabo dentro del mismo circuito.

Las *memorias flash* reúnen la mayor cantidad de ventajas de todas las memorias previamente analizadas (Cappelletti y otros, 2004; Bez y otros, 2003). Estas memorias son dispositivos de alta densidad de almacenamiento, no volátiles, de bajo costo, rápidas –para leer– y reprogramables eléctricamente. Debido a esas características es que el uso de estas memorias se ha difundido notablemente. El borrado se realiza por sector –no por *byte*–, y el tamaño del sector varía entre 256 *bytes* y 16 kb. Otras características que las hacen atractivas son el bajo consumo, su resistencia a los golpes y su tamaño pequeño. Una limitación importante que presentan es que permiten un número restringido de operaciones de escritura y borrado. Se presentan en varios formatos, y los más comunes son las tarjetas, como por ejemplo las *SD* y las *CF cards*, y los *USB*. Para estos últimos no se ha llegado a un consenso sobre el nombre, pero se los conoce también como *flash drive*, *flash pen* y *key drive*. Son muy utilizadas en teléfonos celulares, asistentes digitales personales, cámaras fotográficas digitales y reproductores de MP3, sólo por citar algunos ejemplos.

Por último, las *NVRAM* (*non-volatile RAM*) son similares a las *SRAM* pero con una batería que permite mantener la información. De esta manera, cuando se suministra energía la memoria funciona como una *SRAM*, mientras que, en caso contrario, se apoya en la batería para retener la información. Los resultados obtenidos en algunas investigaciones permiten suponer que los sistemas híbridos, combinación de *NVRAM* y discos duros, serán una excelente opción para mejorar el desempeño de los sistemas de cómputo (Baker y otros, 1992; Edel y otros, 2004).

2. Memorias externas

El almacenamiento secundario y terciario –también llamado memoria secundaria o auxiliar– está formado por un conjunto de dispositivos encargados del almacenamiento masivo de datos, aunque la distinción entre secundario y terciario está en constante evolución. Mientras que en el pasado el almacenamiento secundario fue estrictamente definido como discos duros y el almacenamiento terciario y externo fueron memorias remotas, esta distinción es cada vez más difusa, ya que los discos duros han comenzado a ser móviles y los almacenamientos remotos empiezan a ser las memorias principales de algunos equipos de computación. Todas estas memorias tienen mayor capacidad que las principales y son menos costosas, pero también más lentas. Se las usa para resguardar información que no se está procesando y que es necesaria para usos posteriores. Algunos de los medios de almacenamiento secundario más utilizados son los discos duros, cintas magnéticas, CD, DVD, HD-DVD, *memory sticks*, y discos *Blu-ray*, entre otros. A continuación se presentan las principales características de los medios más conocidos y utilizados.

Discos duros

Un *disco duro*¹³³ es un medio no volátil de almacenamiento, en el cual la información se graba sobre platos con superficies magnéticas. Inicialmente fueron medios externos, pero con el aumento de las necesidades de almacenamiento y con los avances tecnológicos pasaron a ser elementos incorporados, primero en las computadoras y posteriormente en muchos otros equipos –por ejemplo, cámaras fotográficas y de videos, y teléfonos móviles, sólo por citar unos pocos.

Generalmente se disponen varios platos metálicos apilados, con espacio entre ellos, y un motor que controla un grupo de cabezales. Los cabezales son una especie de brazos, en cuyos extremos se encuentran *las cabezas de lectura-escritura* encargadas de leer y escribir información sobre cada cara del disco. Las cabezas no tocan la superficie del disco, y las operaciones se hacen a distancias muy pequeñas para evitar dañarlo.

A medida que la tecnología ha ido evolucionando, las capacidades de almacenamiento y las velocidades de acceso han mejorado notablemente (Grochowski, 1998). Las capacidades de almacenamiento se multiplican al incrementar la densidad, y el tiempo de acceso se reduce al aumentar la velocidad de rotación de los cabezales y la tasa de transferencia. Recientemente ha comenzado a usarse la grabación perpendicular sobre discos duros, que es una nueva tecnología tendiente a fortalecer estas capacidades. Se supone que este tipo de grabación permite almacenar hasta diez veces más datos que con la grabación longitudinal.¹³⁴

Cintas magnéticas

Las *cintas magnéticas* son dispositivos no volátiles, de almacenamiento de información (Bhushan, 2000). Su principal característica es que el acceso a la información es *secuencial*, por tanto su uso se limita, en general, al respaldo de grandes volúmenes de información –copias de seguridad– o al almacenamiento de datos que deben ser procesados en orden secuencial. Este medio magnético se ha desarrollado menos que los discos duros. Asimismo, los costos de estos últimos han ido bajando a medida que

¹³³ En inglés se llama *hard disk*, y de ahí que se lo conozca como HD. A pesar de que a veces se usan indistintamente los términos *disk* y *drive*, es importante destacar que no hacen referencia al mismo concepto. El *disk* es el medio de almacenamiento y el *drive* es el dispositivo que lleva a cabo la lectura y escritura del disco.

¹³⁴ Hitachi presentó un HDD (*hard disk drive*), Deskstar 7K1000 con una capacidad de 1 TB, y una velocidad de 7200 RPM. (Para mayor información consúltese: <http://www.hitachigst.com/portal/site/en/menu-item.8027a91c954924ae4bda9f30eac4f0a0/>). Asimismo, Seagate lanzó un dispositivo HDD, Barracuda, con similar capacidad y velocidad. (Para mayor información consúltese: http://www.seagate.com/www/en-us/products/servers/barracuda_es/barracuda_es.2). Por su parte, Samsung ofrece con su serie F1 un HDD con una capacidad de 1TB en sólo tres discos duros, y a una velocidad de 7200 RPM. (Para mayor información consúltese: http://www.samsung.com/global/business/hdd/newsView.do?b2b_bbs_msg_id=93)

han ido aumentando sus capacidades, por lo que, en algunos casos, las cintas fueron sustituidas por discos. En la actualidad, la mayoría de las cintas se encuentran encapsuladas en cartuchos o casetes, y las capacidades varían de acuerdo con las marcas y modelos.¹³⁵

Los investigadores de la empresa IBM –conjuntamente con sus colegas de la compañía *Fuji Photo Film*– se encuentran trabajando en una nueva tecnología que consiste en cintas magnéticas de doble capa, las cuales permitirán aumentar la densidad de grabación.¹³⁶ Con este avance las cintas magnéticas podrán mantener su vigencia y recuperar algunas ventajas competitivas sobre otros medios.

Discos ópticos

Un *disco óptico* es un medio de almacenamiento hecho de policarbonato, en el que se accede a la información mediante la utilización de un rayo de luz láser. La información se almacena secuencialmente desde el interior hacia la parte externa. La aparición de estos dispositivos marcó un avance importante en el área del almacenamiento; entre ellos los más conocidos y usados son: el CD (*compact disk*), el DVD (*digital versatile disk*), el HD-DVD (*high definition-digital versatile disk*), el disco *Blu-ray* y el disco UDO (*ultra density optical*) (estos tres últimos son los más recientes).

CD (*compact disk*). Un *disco compacto* es un disco óptico para el almacenamiento de información en formato digital (De Watteville y Gilbert, 2000). En sus orígenes fueron discos concebidos para guardar archivos de sonido, pero su uso se extendió y, actualmente, son empleados como memorias externas para preservar información en general. Los CD más comunes son los de 120 mm, aunque también se pueden encontrar de 80 mm –llamados mini CD. Los primeros tienen una capacidad de hasta 900 MB y los otros de hasta 150 MB –grabando en baja densidad– y hasta 300 MB –grabando en alta densidad–, aproximadamente. Existe otra presentación, llamada tarjeta de negocios –*business card*– con una capacidad de hasta 50 MB. Según las operaciones que pueden realizarse sobre los CD, éstos se clasifican en CD-ROM –de lectura solamente–, CD-R –se pueden grabar una sola vez, no se pueden borrar ni volver a grabar–, CD-RW –pueden ser grabados más de una vez, es decir pueden borrarse o reescribirse– (Sherman, 1994). Con respecto a la seguridad, hasta el momento no se han elaborado mecanismos confiables y aceptados a nivel general.

¹³⁵ Uno de los cartuchos con mayor capacidad es el DLT-S4, el cual puede almacenar hasta 1,6 TB de datos comprimidos –800 GB sin comprimir–, con una tasa de transferencia de 432 GB/hr. Además, ofrece facilidades para la administración y la seguridad de la información. (Para mayor información consúltese: <http://www.quantum.com/Products/TapeDrives/DLT/Index.aspx>). Por su parte, IBM tiene en el mercado el *drive* TS1120, con una capacidad de almacenamiento de hasta 2,1TB para datos comprimidos. (Para mayor información consúltese: <http://www-03.ibm.com/systems/storage/tape/enterprise/index.html>)

¹³⁶ Un cartucho producido de esta manera podrá guardar hasta 8 TB de datos sin comprimir. (Para mayor información consúltese: <http://www-05.ibm.com/es/press/notas/2006/mayo/tapedensity.html>).

DVD (*digital versatile disk*). Un *DVD* es un disco óptico usado para el almacenamiento de cualquier tipo de datos, aunque generalmente se lo asocia como un medio para guardar películas –con alta calidad de video y audio– (De Watteville y Gilbert, 2000). Su forma es similar a la del CD, y puede tener un tamaño de 120 u 80 mm. Puede ser de una o dos caras y, a su vez, poseer una o dos capas de datos por cara. Por tanto, la capacidad del disco es determinada por el tamaño, el número de caras y el número de capas. El rango varía desde 1,5 GB –en el caso de los discos de 80 mm– hasta los 17 GB aproximadamente, en discos de doble cara y doble capa. Con respecto a la velocidad de acceso a los datos, es notoriamente mayor en comparación con la correspondiente de los CD. Según las operaciones que pueden realizarse sobre los DVD, éstos se clasifican en DVD-ROM –sólo lectura–, DVD-R –se pueden grabar sólo una vez–, DVD-RW –pueden ser grabados más de una vez, es decir pueden borrarse o reescribirse muchas veces–, DVD-RAM –pueden ser grabados más de una vez, de manera similar a un disco duro y además ofrecen acceso aleatorio.

HD - DVD (*high definition - digital versatile disk*). La sigla *HD-DVD* hace referencia a un formato de almacenamiento óptico, desarrollado para DVD de alta definición (Taylor, Johnson y Crawford, 2006). Con esta nueva tecnología se puede hacer todo lo permitido con los DVD y con los CD pero con mayor capacidad, interacción y resolución –hasta 6 veces la resolución de un DVD y con 7,1 canales de audio. El aspecto de los HD-DVD es similar al de los DVD y al de los CD. Tienen un diámetro de 120 mm y un grosor de 0,6 mm. Funcionan con un rayo láser azul de 405 nm de longitud de onda. Con respecto a la capacidad, ofrecen hasta 15 GB en una sola capa y hasta 30 GB con doble capa. Además, este formato ofrece mecanismos de seguridad para evitar la copia ilegal de la información almacenada. El sistema de seguridad AAC¹³⁷ (*advanced access content system*) se encuentra presente en todos los sistemas comercializados, mientras que el sistema HDCP (*high-bandwidth digital content protection*) es opcional. En la actualidad son varias las empresas productoras de cine que han anunciado la adopción de este formato para el almacenamiento de sus productos. Asimismo, en la consola Xbox 360 de Microsoft también se utilizan los HD-DVD, y Toshiba sacará al mercado a finales del año 2007 su tercera generación de lectoras/grabadoras de HD-DVD. Es importante destacar que son muchas las empresas dedicadas al desarrollo de dispositivos tecnológicos que incluyen este tipo de almacenamiento.

Blu-ray. El *Blu-ray* (rayo azul, del inglés *blue-ray*) es un formato de alta definición para discos ópticos. Su aspecto es similar a los DVD, CD y HD-DVD, y este último es su competencia directa (Taylor, Johnson y Crawford, 2006). Tiene un tamaño de 120 mm, y en él se utiliza un rayo láser de color azul de 405 nm de longitud de onda. El disco *Blu-ray* (BD) es el resultado del emprendimiento de una asociación de empresas, identificada como Blu-ray Disc Association¹³⁸ (BDA), entre las que se destacan

¹³⁷ El AAC¹³⁷ es un estándar para la distribución y administración del contenido almacenado en medios ópticos.

¹³⁸ Para mayor información consúltese: <http://www.blu-raydisc.com/>

Sony, Philips y Panasonic, que han incorporado esta tecnología a sus productos. Una de las grandes ventajas que ofrece el BD es la capacidad de almacenamiento, que se encuentra entre los 25 GB y los 50 GB en discos de una sola cara; otra ventaja importante es su resistencia a las ralladuras y a la suciedad. Con respecto a la seguridad, cuenta con medios para proteger la información almacenada de copias no autorizadas, y los discos se ofrecen en tres formatos distintos: BD-ROM, de lectura solamente; BD-R, que pueden ser grabados y BD-RE, que pueden reescribirse.¹³⁹

UDO (*ultra density optical*). La empresa Plasmon¹⁴⁰ desarrolló un nuevo formato de almacenamiento óptico, siguiendo los lineamientos de *Blu-ray*, llamado *UDO*. Estos dispositivos ofrecen una capacidad de almacenamiento de 60 GB, con una tasa de transferencia de entre 6 MB/s para escritura y 12 MB/s para lectura (Haylor, 2006). Este formato resulta muy apropiado para información que debe guardarse por mucho tiempo, sin cambios, y para respaldos necesarios en caso de desastres. Actualmente ofrece una duración de más de 50 años, lo que hace disminuir el número de migraciones de la información. Por otra parte, incluye tecnología para garantizar la autenticidad y la integridad de la información, lo cual permite asegurar el cumplimiento de normas legales.

Cuando se requiere almacenamiento masivo –en aplicaciones que manipulan imágenes médicas, videos, o similares– no es suficiente el uso de dispositivos, por mucha capacidad que éstos provean. En el contexto del almacenamiento óptico se usan *gabinetes ópticos (optical jukebox)*, que son dispositivos automatizados que acceden a diferentes medios ópticos, como por ejemplo discos *Blu-ray* o discos de alta densidad (Muller, 2002). Otro uso importante de estos gabinetes es para el almacenamiento de información poco usada, ya que permite preservarla sin ocupar espacio en los discos duros o en otros dispositivos más caros –y más rápidos. A este proceso se le llama *migración de la información*.¹⁴¹ pasar la información poco usada de dispositivos rápidos y caros a otros más lentos y menos costosos. La capacidad total del gabinete es muy grande, aunque depende de los medios que lo formen. En general, estos equipos pueden almacenar más de 30 TB.

¹³⁹ TDK lanzó al mercado un disco *Blu-ray* de seis capas, con una capacidad de 200 GB. (Para mayor información consúltese: <http://www.tdk.com/procommon/press/article.asp?site=pro&recid=127>). Por su parte, LG lanzó un BD-RE, modelo GGW-H10N con una capacidad de 50 GB, compatible además con HD-DVD, DVD y CD. (Para mayor información consúltese: <http://www.lge.com/products/model/detail/GGW-H10N.jhtml>). Por último, es importante mencionar que la consola PlayStation 3 incorporó esta tecnología.

¹⁴⁰ Para mayor información consúltese: <http://www.plasmon.com/udo/index.html>

¹⁴¹ La migración de la información se basa en una técnica llamada administración jerárquica de la información (en inglés, *hierarchical storage management* - HSM), que se encarga de llevar automáticamente datos de dispositivos caros y rápidos a otros menos costosos y más lentos. Resulta necesaria en aquellos casos donde se maneja gran cantidad de datos, y mantenerlos en dispositivos rápidos –por ejemplo los discos duros– es demasiado costoso.

b. Hacia sistemas de almacenamiento

Desde los primeros tiempos de la computación se utilizaron dispositivos de almacenamiento; por ejemplo, tarjetas perforadas, cintas y tambores magnéticos y discos conocidos como *floppy*. La aparición de los discos duros promovió un rápido desarrollo de esta área. Los principales beneficios ofrecidos por esta tecnología son la capacidad de acceso aleatorio, la disminución de tiempo de acceso, el aumento de la capacidad de transferencia, el incremento de la capacidad de almacenamiento, el aumento de la confiabilidad, el uso repetido del mismo medio y la portabilidad de los medios (Long, 2006).

El aumento de la densidad de almacenamiento y la disminución de los costos de los medios han propiciado la aparición de nuevas aplicaciones (Morris y Truskowski, 2003). Los efectos más trascendentes de estas tendencias son: que los almacenamientos digitales se convirtieron en un medio más efectivo y barato que el papel, que las películas usadas en radiologías médicas están siendo sustituidas por medios electrónicos y, a nivel del consumidor, que se ha popularizado el almacenamiento digital de videos y fotografías. Los tres casos mencionados son ejemplos de cómo los medios digitales han ido reemplazando los medios usados anteriormente.

Con el correr del tiempo, y a medida que los requerimientos fueron mayores, surgieron los *sistemas de almacenamiento*. Éstos se construyen a partir de los dispositivos pero agregándoles otros elementos de *hardware* y *software* para obtener mayor confiabilidad, mayor desempeño y mayor facilidad de administración. En otras palabras, los avances en los subsistemas de la transmisión y de la computación de la información están influyendo en el patrón de evolución de las tecnologías de almacenamiento. La transmisión permite compartir el almacenamiento y hace disminuir la redundancia de información, mientras los avances en *software* permiten una mejor gestión de información almacenada de manera descentralizada. Los sistemas han evolucionado para proveer cada vez más y mejores servicios; entre ellos cabe mencionar la *conectividad*, la *administración* de la información almacenada y las *interfaces*. La mayor parte de los costos de los sistemas corresponden a los servicios –especialmente a la administración–, mientras que el costo de los dispositivos es notablemente menor. Por tanto, actualmente el reto está en disminuir los costos de la gestión y hacer un uso eficiente de los servicios incluidos en el sistema de almacenamiento para sacar ventaja del precio que se está pagando.

La necesidad de dispositivos de almacenamiento masivo, confiables, de bajo costo e independientes del equipo donde se encuentra el procesamiento, provocó la evolución de dispositivos o componentes a sistemas, entre los que se distinguen los arreglos RAID (*redundant array of independent disks*), los sistemas NAS (*network attached storage*) y los sistemas SAN (*storage area network*). Los dos últimos son también consecuencia de la evolución de las redes y del aumento de conectividad en las tecnologías de la información.

1. Arreglo RAID (*redundant array of independent disks*)

Un arreglo *RAID* consiste de un conjunto de múltiples discos independientes, pequeños y de bajo costo, con el que se logra un desempeño mejor que el que ofrecería un disco grande y costoso (Patterson, Gibson y Katz, 1988; Kim, Zhu y Zimmermann, 2007). Para la computadora, el arreglo de discos representa una única unidad lógica de almacenamiento.

El arreglo RAID es útil para almacenar grandes cantidades de información –la cual se distribuye entre los discos– a un costo razonable. Una de las razones para usarlo es que aumenta la velocidad de acceso, la capacidad de almacenamiento y la integridad; además, mejora la eficiencia de recuperación en caso de fallas. Este sistema se ofrece en varios niveles o configuraciones, cada uno de ellos con características especiales. Los niveles se identifican por números del 0 al 5, y el 5 es el más difundido. La implementación del arreglo de discos puede lograrse a través del *software*, del *hardware* o híbridos. Los sistemas RAID también pueden usarse de manera anidada, es decir, en un RAID se emplea otro RAID en vez de un disco físico, y el anidamiento permite reunir las ventajas que ofrecen distintos niveles. Por ejemplo, el nivel 0 favorece el rendimiento pero no tiene redundancia, por tanto al combinar este nivel con uno que sí lo ofrezca se logra tener en un sistema RAID alto rendimiento y redundancia.

2. Sistema NAS (*network-attached storage*)

Un sistema *NAS* se define como un sistema de archivos conectado por medio de una red de computadoras, lo cual permite que distintos clientes tengan acceso a los datos almacenados de manera centralizada, y releva a otros servidores –de esa red– del manejo de los archivos (Gibson y Van Meter, 2000). Por tanto, *NAS* provee la *capacidad de almacenamiento* y el *sistema de archivos*, es decir, el espacio para guardar la información y el *software* necesario para manipularla.

Como todo sistema de almacenamiento, cuenta con una parte de *software* y otra de *hardware*. El *software* permite el almacenamiento, el acceso y la administración de la información, y el *hardware* cumple una función similar a la de un servidor de archivos. Generalmente, los sistemas *NAS* cuentan con uno o más discos duros, que pueden estar agrupados en un RAID; además, usan protocolos basados en archivos. Considerando que la red puede estar conectada a internet, *NAS* es un sistema que favorece el intercambio de archivos y hace más fácil que la información sea compartida entre numerosos usuarios. Los sistemas *NAS* se usan para complementar sistemas de bajo costo, que quedan provistos de servicios de almacenamiento para el manejo de grandes cantidades de información. Actualmente, están ocupando de manera creciente el mercado de las computadoras para empresas pequeñas y para el hogar, debido al volumen de datos multimedia que se está manejando.

Las ventajas que ofrece usar *NAS* radican en que se aumenta la disponibilidad de datos y el desempeño mejora debido al servidor dedicado al sistema. Sin embargo, los beneficios quedan limitados por el tráfico y la velocidad de la red. Con respecto a la seguridad, hasta el momento no se han reportado medidas totalmente confiables para

resguardar la integridad de los datos almacenados. El uso de este sistema se vio favorecido porque se distribuye en forma de paquete, con funciones de administración y utilerías.

3. Sistema SAN (*storage area network*)

Un sistema *SAN* es una red que conecta, de manera segura y rápida, servidores, RAID, bibliotecas de cintas y otros dispositivos de almacenamiento (Tate, Lucchese y Moore, 2006). En otras palabras, con una red *SAN* se establece la comunicación entre varios servidores y medios de almacenamiento por medio de una red compartida, de tal manera que estos dispositivos aparecen como locales. Se considera que el modo de acceso de *SAN* es de bajo nivel, se trabaja con bloques de almacenamiento, y el sistema de archivos queda a cargo del cliente. Esta característica establece una distinción importante con el sistema *NAS*, el cual funciona con archivos y protocolos de acceso a archivos.

El sistema de archivos *SAN* permite una mejor administración de los datos y proporciona servicios importantes, como por ejemplo políticas que ayudan al desempeño, disponibilidad, seguridad y costo. Una de las principales ventajas que ofrece *SAN* es que favorece compartir información y maximiza el uso de espacio de almacenamiento. También representa una excelente opción para la recuperación de información en casos de desastres o pérdidas por daños. Versiones recientes permiten la duplicación en tiempo real de una unidad lógica, lo que representa un gran avance en caso de respaldos, desastres o duplicación de sistemas. A pesar de los beneficios que representa, y debido a los costos, todavía sigue siendo un recurso usado casi exclusivamente en las grandes empresas.

Los sistemas de almacenamiento en red se están imponiendo sobre los almacenamientos locales. En los años noventa el número de *NAS* y *SAN* era muy pequeño comparado con el total de medios de almacenamiento locales en operación. Ya en 2003 se registró un cambio importante, y aproximadamente el 50% correspondía a sistemas en red (*NAS* el 10,9% y *SAN* el 44,1%). La tendencia en 2007 era que estos sistemas representaban un 78% del total, dividido en un 18,8% para soluciones *NAS* y un 59,2% para soluciones *SAN* (Dwivedi, 2006). Finalmente, cabe mencionar que con un arreglo RAID se ofrece una alternativa para aumentar las capacidades de los dispositivos del tipo de los discos duros, mientras que con los sistemas *NAS* y *SAN* se aprovechan las ventajas propias de las redes para ganar en conectividad con diversos medios de almacenamiento. Los dos últimos ofrecen la solución a la demanda creciente de disponer de mayor cantidad de datos en cualquier momento y desde cualquier lugar, una exigencia que anteriormente era casi exclusiva de las grandes empresas y actualmente es la que ejerce casi cualquier usuario de las tecnologías de la información.

4. Almacenamiento autónomo

Una solución al desafío de facilitar y abaratar la administración (Morris y Truskowski, 2003) podría ser la *computación autónoma* (Ganek y Corbi, 2003; Kephart y Chess,

2003). Para alcanzar la autonomía deseada, se deben desarrollar sistemas capaces de configurarse, repararse, protegerse y optimizarse. A pesar de que estos conceptos son nuevos y todavía resulta difícil convertirlos en realidad, es importante destacar su importancia debido a la dependencia creciente que tenemos de las tecnologías.

La autonomía se debe presentar en tres niveles. El primero de ellos es el nivel de componentes, con lo cual cada parte debe poder configurarse, repararse, protegerse y optimizarse. Luego está el nivel de sistemas, es decir, sistemas homogéneos o heterogéneos deben cumplir con las condiciones ya mencionadas. En el último nivel, varios sistemas heterogéneos deben funcionar autónomamente con el fin de alcanzar los objetivos indicados por la administración. Los sistemas de almacenamiento deben tender a satisfacer estos criterios de autonomía; por ejemplo, si se presenta alguna falla, deben poder aislar el sector dañado y seguir operando –una manera de repararse–, o dependiendo de la naturaleza de la información, y de acuerdo con los objetivos de la organización, deben decidir de manera autónoma bajo qué condiciones se guarda la información: favoreciendo la disponibilidad, dándole prioridad a la protección, u otras.

c. *Desafíos actuales y nuevas formas de almacenamiento*

En la arquitectura de computadoras propuesta por Von Neumann (Hillis, 1989; Von Neumann, 2000), la cual sigue vigente, los datos se encuentran separados de la unidad de procesamiento. Esta característica, a pesar de todas las ventajas que tiene, presenta una limitación debido a la capacidad de transferencia de datos entre la unidad de procesamiento y la memoria. A esta limitación se la conoce como *el cuello de botella de Von Neumann*. Todos los datos, su localización y las operaciones deben ser transferidos entre la unidad de procesamiento y la memoria, *palabra por palabra*. Riley (1987) señala que, además, constituye un *cuello de botella intelectual*, ya que condiciona la manera en la que se piensa acerca de la computación y la manera en la que se programa. En las computadoras actuales la tasa de transferencia es menor que la velocidad de procesamiento, lo cual ocasiona que el desempeño de la computadora se vea afectado desfavorablemente. La velocidad de procesamiento de las computadoras y las capacidades de memoria aumentan rápidamente, mientras que la tasa de transferencia no mejora al mismo ritmo, lo cual agrava la situación. Parcialmente se logra reducir el tiempo de acceso por medio de memorias *caché*¹⁴² y de *algoritmos de predicción de bifurcaciones*.¹⁴³

Existen otros retos que deben superarse y que exigen el desarrollo de nuevas tecnologías de almacenamiento. Uno que merece destacarse es el de la *recuperación* de

¹⁴² Caché es una memoria de alta velocidad, usada para guardar temporalmente información y reducir los tiempos de acceso.

¹⁴³ Se utilizan para predecir si una rama de un condicional se ejecutará o no, y sobre la base de esta predicción se recupera o no la instrucción correspondiente sin esperar a que el condicional se evalúe. De esta manera se mejora el desempeño de los procesadores.

información en caso de desastres (Lam, 2002). La información guardada juega un papel fundamental tanto para las organizaciones como para las personas. Por tanto, los responsables de las tecnologías de la información deben prever este aspecto cada vez con mayor cuidado. Para esto se puede recurrir a algunos de los sistemas presentados, que con la ayuda de redes permiten recuperar y disponer de la información resguardada, una vez superada la crisis. Los *respaldos* también constituyen otro problema a solucionar. No es conveniente interrumpir el procesamiento¹⁴⁴ para llevar a cabo el respaldo, por tanto se requiere hacer copias en tiempo real –duplicaciones– y usarlas para los respaldos. Sin embargo, los tiempos necesarios siguen siendo una posible causa de errores de coherencia o de pérdida de información.

Otro desafío importante está relacionado con el *volumen creciente de información*. Una de las causas es que en la actualidad gran parte de la información se produce *automáticamente*, por medio de distintos equipos –por ejemplo fotografías, videos, imágenes médicas, imágenes tomadas desde satélites, entre otros. Como se ha visto en el capítulo de interfaces, los avances en sensores conducen a una cantidad sin precedentes de información automáticamente producida. Por tanto, se requieren nuevas tecnologías para el almacenamiento, el análisis y la administración de tantos datos producidos. Los llamados *datos de referencia* son otra fuente de información masiva; estos datos son los que deben guardarse como respaldo de operaciones efectuadas, pero que difícilmente se vuelven a usar, como por ejemplo los datos presentados por un solicitante de una tarjeta de crédito. Éstos se validan, se guardan, pero una vez resuelta la solicitud, no se utilizan. Por otra parte, con el avance de las redes también aumentó la cantidad y la disponibilidad de información. Ya es una necesidad que los datos producidos en una organización estén disponibles para cualquier persona vinculada a ella; además, el disponer de datos producidos en otros lugares exige mayor capacidad de procesamiento y de almacenamiento en las computadoras.

Para el manejo de estos volúmenes se deben cuidar especialmente dos aspectos, el tiempo de acceso y el espacio. Con respecto al acceso, se deben desarrollar tecnologías que permitan buscar y recuperar datos independientemente de donde se encuentren, y aplicando criterios –por ejemplo, por contenido– que puedan agilizar el proceso. En cuanto al espacio, una alternativa para disminuir costos son las bibliotecas *near-line* (Green, 2003), en las cuales se sacrifica el tiempo de recuperación de la información por el costo del medio. Por ejemplo, en un sistema de videos por demanda, los videos no están disponibles en línea sino que se encuentran en una biblioteca de gran capacidad. Cuando un cliente realiza un pedido, el video se transfiere de esa biblioteca a una unidad en línea y queda disponible para el solicitante.

La *conservación de la información* a largo plazo es otro tema que está cobrando interés y que necesita ser resuelto próximamente. La tecnología cambiante propicia que los formatos usados para el almacenamiento varíen y, además, los dispositivos y los programas usados para leer y escribir tienen generalmente poca duración. Obvia-

¹⁴⁴ Existen aplicaciones en las cuales es imposible interrumpir sin ocasionar daños graves e irreparables.

mente, no serviría guardar información que no puede ser encontrada y, que de serlo, no podría ser entendida. La solución parece ser el desarrollo de medios con larga vida útil, y garantizar la compatibilidad entre ellos, así como facilitar la migración entre las distintas tecnologías.

Por último, es importante mencionar que al disminuir el tamaño y aumentar la capacidad y la conectividad de los sistemas, se está aumentando también el riesgo de pérdida y de copias no permitidas de la información almacenada en ellos.

Los discos duros han permanecido como la opción más usada para el almacenamiento digital. Nuevas tecnologías, como las memorias *flash*, no han logrado todavía alcanzar el nivel de madurez –en confiabilidad, costo, capacidad– para reemplazarlos. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, existen varios retos a superar que requieren de la investigación y desarrollo de nuevas formas de almacenamiento. Estas deben evolucionar de tal manera que se disminuyan los costos de la administración y la dependencia de los sistemas, y por otra parte se facilite su uso –independientemente de las plataformas involucradas– y se mejore la seguridad, integridad y permanencia de los datos.

1. Memorias flash con nanotecnología

Investigadores de la Universidad de Texas A&M y del Instituto Tecnológico Rensselaer, en Estados Unidos, han diseñado un tipo de memoria *flash* construida con nanotubos de carbono que se pueden rellenar de hierro o de un medio ferromagnético (Kish y Ajayan, 2005). Las memorias *flash* construidas con nanotubos de carbono tendrán una capacidad potencial de 40 GB por centímetro cuadrado y 1.000 TB –*terabytes*– por centímetro cúbico. Un TB representa 1.000 GB, aproximadamente el contenido de 26 DVD. En un arreglo de nanotubos de carbono cruzados, cada junta –unión– almacena un *byte* de información. Laszlo Kish, profesor de ingeniería eléctrica de la Universidad de Texas A&M, señala que si se cruzan el mismo número de nanotubos como el número de transistores que existen o contendrán los microprocesadores, es posible deducir que en una memoria de estructura tridimensional se podrán almacenar 1.015 terabytes, el equivalente a 1.000.000 de GB.

Por otra parte, Lu y Dai (2006), dos investigadores de la Universidad Politécnica de Hong Kong, también han desarrollado recientemente una memoria *flash* compuesta de *nanotubos de carbono* en la capa de carga-almacenamiento. Los nanotubos se encuentran inmersos en una capa de HfAlO –hafnio, aluminio y oxígeno–, la cual sirve como la puerta de control y la capa de óxido. Dai señala que la excelente retención de carga del dispositivo se debe principalmente a las propiedades únicas –tanto eléctricas como de estructura– de los nanotubos de carbono.

2. Discos versátiles holográficos (*holographic versatile disks, HVD*)

Las características de los discos holográficos, tal como la alta densidad y tasa de transferencia, junto con otras como confiabilidad, bajo costo, flexibilidad y larga duración, los convierten en una excelente tecnología para cubrir algunos de los retos pendientes.

tes. Los discos holográficos son una nueva tecnología de discos ópticos. Los primeros productos comerciales aparecieron en el transcurso de 2007, aunque ya se habían contemplado las memorias holográficas desde los años sesenta. La holografía¹⁴⁵ supera los límites conocidos de densidad de almacenamiento, debido a que permite grabar aprovechando la profundidad del medio y no sólo la superficie. Además, la operación de lectura y grabación se lleva a cabo al manipular millones de *bits* con un haz de luz, por tanto la tasa de transferencia es muy alta si se compara con otros medios ópticos.

Un disco HVD de 3,9 TB de información podría, por ejemplo, almacenar aproximadamente la capacidad de 5.500 CD-ROM, 830 veces la capacidad de un DVD, y 160 veces la capacidad de un disco *Blu-ray* de capa simple. En perspectiva, se ha estimado que la biblioteca del Congreso de Estados Unidos, una de las más grandes del mundo, contiene cerca de 20 TB, si los libros fueran escaneados en formato texto. Esto significa que con solo 6 HVD de 3,9 TB se podría almacenar el contenido de la biblioteca completa.

Actualmente hay tres empresas que dominan el mercado de los discos versátiles holográficos: Optware Corporation,¹⁴⁶ Call/Recall Inc.¹⁴⁷ e InPhase.¹⁴⁸ Optware Corporation, la compañía que diseñó el formato HVD, ofrece discos holográficos con una capacidad de 200 GB y con una tasa de transferencia de 14 MB/s. Las empresas que han incorporado esta tecnología son: Fuji, CMC Magnetics, Konica, Mitsubishi y Pulstec International. Optware Corporation utiliza, además, una tecnología óptica novedosa, *collinear technology*, que permite leer y escribir eficientemente sobre estos discos (Horimari y Tan, 2006). La empresa Call/Recall Inc., por otra parte, desarrolló una tecnología para trabajar tanto con discos ópticos como con memorias holográficas. La tecnología propuesta proveerá discos con una capacidad muy grande, hasta 15 TB y un acceso de hasta 500 MB/s, con un polímero de bajo costo y larga duración. Finalmente, la empresa InPhase ha desarrollado un formato similar y rival del HVD, conocido con el nombre de *Tapestri Media* (Robinson, 2005), que permite una capacidad de 300 GB, con una tasa de transferencia de 20 MB/s y una durabilidad media de 50 años. La siguiente etapa es llegar a los 800 GB con una tasa de transferencia de 80 MB/s, y a 1,6 TB en el año 2009. Esta tecnología ya fue adoptada por la empresa Ikegami Electronics, Inc.,¹⁴⁹ y será incluida en las cámaras profesionales de filmación,

¹⁴⁵ La holografía es una técnica avanzada de fotografía, en la que se utiliza un rayo láser para grabar microscópicamente una película fotosensible. Al recibir la luz desde la perspectiva adecuada, esta película proyecta una imagen en tres dimensiones. Por su naturaleza, tanto la operación de escritura como la de lectura involucran grandes bloques de datos.

¹⁴⁶ Para mayor información consúltese: <http://www.optware.co.jp/english/top.htm>

¹⁴⁷ Para mayor información consúltese: <http://www.call-recall.com/>

¹⁴⁸ Para mayor información consúltese: <http://www.inphase-technologies.com>

¹⁴⁹ Para mayor información consúltese: <http://www.ikegami.com/>

que ya no usarán cintas. Hitachi, Sony, Sanyo, HP, Maxwell, IBM, Toshiba, Samsung y Matsushita son empresas que han adoptado esta tecnología.

3. Discos PCD (*protein coated disks*)

Los materiales que se han utilizado hasta la fecha en la microelectrónica han sido inorgánicos. Las nuevas tecnologías impulsan el empleo de nuevos materiales orgánicos, como las proteínas, que cambiarán significativamente el diseño y construcción de los dispositivos de almacenamiento al combinar material biológico y no biológico. Una de las nuevas tecnologías que promete soluciones a los desafíos planteados es la computación molecular. Las investigaciones realizadas indican que ofrecerá grandes ventajas sobre los medios ópticos o magnéticos conocidos. La tecnología se basa en guardar la información en proteínas fotosensibles, que provienen de una bacteria que habita en ciénagas saladas, la *halobacterium salinarum*.

Un disco PCD está recubierto con miles de proteínas sensibles a la luz (Renugopalakrishnan y otros, 2007); la proteína convierte la energía solar en energía química. Considerando esta característica, la proteína puede actuar como un *bit*, tomando los valores 0 o 1, del sistema binario, es decir, usar la propiedad de ser sensible a la luz para almacenar y manipular datos. La habilidad de las proteínas para tomar formas tridimensionales y generar cubos permitirá el desarrollo de memorias tridimensionales, con las consecuentes ventajas en cuanto a la capacidad de almacenamiento y la velocidad de acceso a la información. Para las operaciones de lectura y escritura interviene la luz, por lo que a estas memorias también se las llama *memorias ópticas 3D basadas en proteínas*.

Existen tres grandes ventajas de un dispositivo de memoria construido con estas proteínas: a) las operaciones de lectura-escritura se podrán realizar en paralelo, b) se utilizará la óptica en la que los fotones son mucho más rápidos que los electrones, y c) la memoria podrá ser tridimensional, lo cual permitirá almacenar densidades de 10^{11} a 10^{13} bits por cm^3 (Wilson y otros, 2002). A pesar de que esta tecnología tiene grandes ventajas, entre las que se puede mencionar el costo,¹⁵⁰ el tamaño, la flexibilidad en cuanto al ambiente de operación y la densidad de memoria, por ahora no se encuentra comercialmente disponible.

4. Memorias cuánticas

El uso de los *qubits* no constituye una ventaja sobre la computación clásica en cuanto al almacenamiento de información, debido a que aún existen problemas prácticos por resolver, que representan un obstáculo para el uso de esta tecnología en la forma de memorias. Una de las principales dificultades es el manejo del ruido –errores– durante el proceso de preparación del *qubit*. Por otro lado, también resulta problemá-

¹⁵⁰ Las proteínas están disponibles y por tanto resulta poco costoso producir muchas memorias.

tica la lectura de un *qubit*, ya que la simple interacción con él lo altera; este fenómeno es conocido como *decoherencia*.

Sin embargo, existen algunos experimentos¹⁵¹ que demuestran que es posible almacenar *qubits* y posteriormente recuperarlos sin alterar sus valores. Por ahora el tiempo de duración de estas memorias es muy corto, una limitación que seguramente se superará con la evolución de esta tecnología. A pesar de los inconvenientes señalados, se espera que en un futuro no muy lejano se pueda aplicar esta tecnología para el desarrollo de memorias cuánticas (Ficek y Swain, 2004; Song y Sun, 2004).

c. Conclusiones

Los sistemas de almacenamiento ya no pueden tratarse como simples dispositivos dedicados a guardar información. Son sistemas complejos en red, con componentes de *hardware* y *software*, y este último está encargado de ejecutar funciones cada vez más importantes y complejas.

Como en todos los subsistemas de las TIC, se puede sentir la influencia de los demás subsistemas, y también la importancia creciente de la biotecnología y la nanotecnología. Los avances en las redes de transmisión convierten el almacenamiento en una red de memorias, donde las tres tareas básicas de una máquina de Turing –manipulación, escritura y lectura–, son realizados en diferentes ubicaciones. La memoria puede estar separada de la unidad central de procesamiento, y conectada a ella por medio de una red externa.

También las memorias mismas muestran avances; en los sistemas holográficos se ve un gran potencial en cuanto a capacidad y flexibilidad. Las memorias que funcionan sobre la base de proteínas, combinadas con tecnología tridimensional, permitirán agilizar las transacciones en bases de datos y multiplicar el número de aplicaciones en el área de reconocimiento de patrones y procesamiento de imágenes. Seguramente las capacidades y funcionalidades de los sistemas de almacenamiento irán creciendo con la combinación de distintas tecnologías, y derivarán en, por ejemplo, el desarrollo de memorias cuánticas-moleculares (Renugopalakrishnan y otros, 2007).

Actualmente se cuenta con medios confiables que pueden interconectarse a servidores y a otros sistemas de almacenamiento. En un futuro, tal vez no muy lejano, cabe esperar el surgimiento de sistemas heterogéneos y autónomos, diseñados y desarrollados aprovechando los beneficios que ofrece cada una de las tecnologías disponibles, capaces de organizarse de tal manera que puedan responder a todos los desafíos anunciados.

¹⁵¹ Existen varios grupos de investigadores trabajando en esta área. Se destacan los de la Universidad de Harvard y los del Instituto Max Planck.

15. LA AMPLIFICACIÓN DE LA INTELIGENCIA BIOLÓGICA¹⁵²

Tal como se ha planteado en la introducción de este libro, el desarrollo de las sociedades de la información y del conocimiento se caracteriza por el progreso acelerado y la difusión masiva de tecnologías con las que se transmite, computa, almacena e interopera información. En esta parte también se ha definido que una tecnología es básicamente una solución que presenta una respuesta a una interrogante, como la manera de transmitir información de un lugar a otro, o de combinar informaciones. Considerando ambas definiciones, cualquier medicamento, droga o experimento de ingeniería genética que apunte al mejoramiento de la inteligencia humana, como una mayor capacidad de memoria o procesos de aprendizaje más efectivos, pueden ser entendidos como tecnologías de la información y de las comunicaciones (TIC). Se debe hallar una respuesta a la pregunta: “¿cómo aumentar la inteligencia biológica?”, por tanto las soluciones están en las tecnologías, y el resultado contribuye a un mejor procesamiento de información y a la creación de conocimiento en la sociedad. Los avances de la biotecnología conducen el concepto de TIC a una nueva era, donde el progreso tecnológico no sólo empuja la frontera de la inteligencia artificial, sino también apunta a la amplificación de la inteligencia biológica.

Con los avances actuales en el estudio del funcionamiento del cerebro, la neurología, se sabe que los sentimientos y las habilidades son fundamentalmente eventos neuroquímicos que permiten procesar información a partir de la percepción y el conocimiento adquirido, y que tienen características subjetivas relacionadas con la arquitectura de la mente. El diseño y la síntesis de fármacos, principalmente dirigidos a aliviar padecimientos que afectan las funciones cerebrales –como el Alzheimer y el Parkinson–, impulsaron el uso de medicamentos para incrementar las funciones cognitivas de una persona sana. Actualmente se tiene la posibilidad de elaborar sustancias o drogas inteligentes también conocidas como “nootrónicos” dirigidas a este fin. También existe una gran cantidad de drogas inteligentes dirigidas a modificar de alguna forma las funciones cerebrales, y son utilizadas en personas con alteraciones en

¹⁵² Este capítulo ha sido elaborado por Edmundo Lozoya Gloria del Departamento de Ingeniería Genética del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N. (Cinvestav), México.

esas funciones. Muchas de estas sustancias están relacionadas con los neurotransmisores en cuanto a su estructura o su biosíntesis; algunas de estas drogas inteligentes han producido un incremento en las capacidades cognitivas de personas sanas y su uso de ha vuelto más común debido a diversos factores como las presiones laborales y económicas o los fines recreativos.

Con el apoyo de la biotecnología, la manipulación genética y el conocimiento del genoma humano, mejoran las posibilidades de controlar y modificar las funciones cerebrales, al mismo tiempo que se acentúa el compromiso que el ser humano adquiere sobre las consecuencias que esto pueda tener para sí mismo, para los demás organismos del planeta y finalmente para la supervivencia de todos. La biotecnología, el descubrimiento de “bionootrópicos” de acción molecular y el conocimiento del genoma humano, abren innumerables posibilidades para modificar más aún el funcionamiento del cerebro y de otros órganos y capacidades humanas. Las implicaciones éticas de estos usos son de consideración y apenas ha comenzado la discusión al respecto.

a. Ideas y conceptos básicos

Con el descubrimiento, quizá fortuito al principio y de manera más organizada después, del efecto que tenían algunos extractos de plantas y otras sustancias sobre la percepción del mundo, comenzaron a buscarse más y mejores formas de mejorar esa comprensión y de obtener medios más eficaces para lograrlo. Cuando ya hemos podido elaborar herramientas y usarlas para fortalecer nuestras capacidades físicas y para fabricar aparatos que nos permitieron aumentar nuestra velocidad de movimiento, volar sin estar diseñados naturalmente para ello, llegar a otros planetas y conocer su estructura y composición, e incluso propagar nuestras ideas y comunicación no sólo por medio del lenguaje hablado y escrito, pero también a través de máquinas que facilitan nuestras capacidades cognitivas y que nos complementan en la tarea de crear conocimiento, entendemos que apenas estamos empezando a descubrir nuestras verdaderas capacidades cognitivas (Calvin 1997). En el momento que se aceptó que el cerebro era el lugar en el cual residían y se originaban estos conceptos, así como su función controladora sobre el resto del organismo, empezó entonces una búsqueda intensa y dirigida para conocer mejor y multiplicar las capacidades de este órgano. Este conocimiento puede ayudar a mejorar los procesos cognitivos que se refieren a la facultad de los seres de procesar información a partir de la percepción, el conocimiento adquirido y características subjetivas que permiten valorar y considerar ciertos aspectos en detrimento de otros. Estos procesos están íntimamente relacionados con conceptos abstractos, como mente, percepción, razonamiento, inteligencia, aprendizaje y muchos otros que describen numerosas capacidades de los seres superiores. El uso de extractos de plantas y otras sustancias para mejorar nuestras habilidades cognitivas tiene una larga historia. Acompañantes tradicionales han sido el café, cacao o la glucosa concentrada, para mejorar la atención y vigilancia, o por el contrario el uso de valeriana como calmante y tranquilizante natural, como incontables variedades de té o tabacos con fines diversos. Desde hace miles de años estas técnicas han sido utilizadas por la humanidad, y hoy día muchas de ellas son generalmente acepta-

das a nivel social. Durante las décadas pasadas, la industria farmacéutica ha invertido sumas extraordinarias en la investigación y el desarrollo de una gran diversidad de sustancias que dan continuidad a esta tradición y la profundizan.

Además, se está iniciando una nueva era en la que podemos modificar incluso la vida misma y diseñar organismos con capacidades nunca vistas o imaginadas, sea o no aceptado en algunos sectores. La realidad es que el ser humano no se va a detener en su búsqueda de superación, especialmente cuando ya hemos comenzado a tener la capacidad incluso de modificarnos a nosotros mismos, saliéndonos de las normas tradicionales y preconcebidas de las reglas de la evolución, de la selección natural, de los tiempos establecidos de vida y de las condiciones naturales en las que se debería vivir esa vida. Como especie dominante en este planeta, utilizamos nuestros conocimientos para tratar de mejorarnos a nosotros mismos y ayudar a quienes –por desgracia– no pueden utilizar todas las capacidades que tienen la mayoría de los seres humanos. Con estas nuevas posibilidades de alteración biológica controlada que estamos apenas vislumbrando, hemos adquirido también y con mayor intensidad, la responsabilidad sobre nuestras acciones (Bostrom 2005). Considerando lo anterior, es claro que cualquier posibilidad de modificar, incrementar y mejorar las capacidades del cerebro humano, tendrá muy probablemente consecuencias a corto, mediano y largo plazo para todos los organismos de este planeta.

1. Más allá de la inteligencia humana

En laboratorios de todo el mundo, investigadores diversos están buscando formas para ayudar a los enfermos y han intentado aplicar técnicas que mejoran las capacidades de animales sanos haciéndolos más fuertes, más rápidos, más listos y con mayores expectativas de vida en algunos casos (Naam, 2005). Por medio de las mismas investigaciones que se realizan actualmente para buscar la cura del Alzheimer y el Parkinson, se están produciendo fármacos y técnicas genéticas que podrían incrementar la inteligencia humana. Las técnicas que se están desarrollando ahora contra las enfermedades del corazón y diversos tipos de cáncer, tienen el potencial de detener la pérdida de habilidades cognitivas.

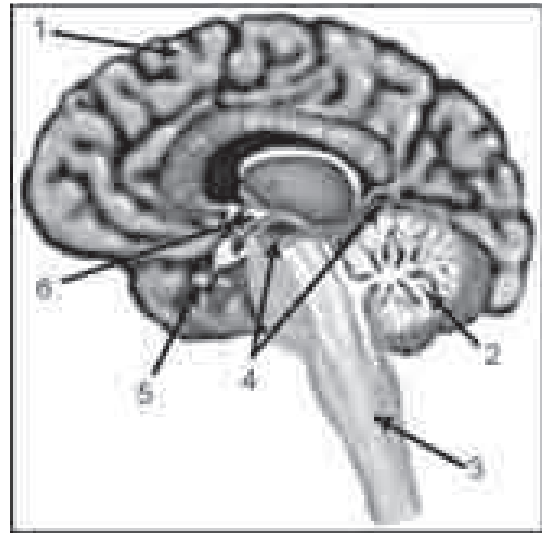
Casi la mitad de las personas con más de 85 años de edad tiene Alzheimer (Alzheimer's Association, 2006), y una manera de combatir esa enfermedad es mediante el uso de un químico llamado NGF (*nerve growth factor*) (Tuszynski y otros, 2002). Se ha descubierto que ratones con niveles superiores de NGF han resuelto pruebas de navegación de laberinto 60% o cinco veces más rápido que ratones comunes (Brooks, Cory-Slechta y Federoff, 2000). En otros casos, la manipulación genética que aumenta el nivel de CREB (por su sigla en inglés de “*camp response element-binding*”) en cerebros de moscas mejoró significativamente sus memorias (Yin y otros, 1995). Los insectos fueron capaces de asociar un olor específico a un choque eléctrico después de una sola repetición, mientras que las moscas normales necesitaban unas diez veces para aprender la misma relación.

La búsqueda de medicamentos para mejorar las condiciones de personas con alteraciones en sus funciones cerebrales y cognitivas, ha abierto la posibilidad de me-

jorar esas capacidades en personas normales. La tremenda influencia de incentivos económicos de todo el mundo, la posibilidad que tenemos actualmente de producir y obtener información sobre casi cualquier cosa a través de los diversos medios de comunicación digital, y la facilidad con la que se pueden conseguir diferentes productos y medicamentos nuevos, son todos factores que están influyendo en los avances con los que se apunta a modificar el funcionamiento de nuestros cerebros. Los resultados quizá no sean del todo aceptables o benéficos para muchos, y las consideraciones éticas de estas actividades pueden variar dependiendo de nuestra propia y limitada concepción del entorno en el que existimos, pero lo que no puede objetarse es que este movimiento ya se ha iniciado y que es cada día menos probable que se detendrá.

2. *Cómo funciona el cerebro*

Para poder entender los avances actuales en las tecnologías que apuntan a la amplificación de la inteligencia biológica, es indispensable revisar brevemente la estructura y el funcionamiento del cerebro, que es el sujeto de cualquier intervención. El cerebro es la entidad más compleja y avanzada que conocemos para procesar información y producir conocimiento. Como se ha visto en la primera parte del libro, el cerebro es más rápido y potente que cualquier computadora, ocupa la mitad superior de la cabeza, parece una esponja gris, arrugada y blanda, y tiene el grosor de un envase de cartón de leche. En estado adulto, pesa aproximadamente 1.400 gramos y la parte más importante es la corteza cerebral. Ésta constituye el 85% del peso del cerebro y es la parte pensante. Es la que nos permite razonar y ser más inteligentes que los animales. La corteza cerebral está formada por dos mitades, una a cada lado de la cabeza y se considera que la mitad derecha controla la parte izquierda del cuerpo y se encarga de los conceptos abstractos, como por ejemplo, la música, los colores o las formas. La mitad izquierda es la analítica y controla la parte derecha del cuerpo; es la encargada de entender las matemáticas, la lógica y el discurso. El área motora recorre las dos mitades del cerebro de oreja a oreja y controla los músculos que se mueven a voluntad. El cerebelo está en la parte posterior del cerebro, por debajo de la corteza, y controla el equilibrio, el movimiento y la coordinación de los músculos. El tronco encefálico está situado debajo de la corteza cerebral y delante del cerebelo. Conecta el resto del cerebro a la médula espinal, que recorre el cuello y la espalda, y se ocupa de las funciones ne-



Esquema del cerebro.

1. Cerebro; 2. Cerebelo; 3. Troncoencefálico;
4. Hipocampo; 5. Glándula pituitaria; 6. Hipotálamo.

cesarias para que el cuerpo esté vivo, como la respiración, la digestión de alimentos y la circulación sanguínea, ya que controla los músculos que funcionan involuntariamente, como el corazón y el estómago. También clasifica los millones de mensajes que el cerebro y el resto del cuerpo se envían. El hipocampo forma parte de la corteza cerebral y se supone que es una de las zonas del cerebro que se ocupan de la memoria. Hay distintas clases de memoria y el hipocampo se encarga de transferir la información entre las memorias a corto y a largo plazo. La glándula pituitaria es muy pequeña, del tamaño de un chícharo o guisante. Se encarga de producir y liberar hormonas que controlan la cantidad de azúcares y agua en el cuerpo, y ayudan a mantener el metabolismo activo para conservar el cuerpo vivo, creciendo y con energía por medio de la respiración, la digestión de los alimentos y la circulación de la sangre. Esta glándula juega un papel muy importante durante la pubertad. Por último, el hipotálamo se encuentra justo en el centro del cerebro. Es el termómetro interno, ya que mantiene la temperatura del cuerpo a 37 grados centígrados y transmite mensajes que indican si se debe sudar cuando hace calor o temblar cuando hace frío. Es la forma de mantener constante la temperatura interna independientemente de la actividad que se esté haciendo o de la temperatura externa (Purves y otros, 2001; Mora, 2005). El cerebro está siempre funcionando, incluso durante el sueño, que es como un descanso para el cuerpo¹⁵³ (Arbib, 2002; Montes Rodríguez y otros, 2006).

En los últimos años se han logrado grandes avances en la neurología, gracias a las tecnologías de la información y de las comunicaciones (TIC) que están específicamente diseñadas para estudiar cómo funciona el cerebro. Las técnicas actuales para obtener imágenes del cerebro mientras está funcionando, han alcanzando dimensiones únicas de análisis de hasta un milímetro cuadrado de superficie y en espacios de tiempo de unos pocos segundos. Ya es obsoleto el uso de la tomografía axial computarizada (CAT, por su sigla en inglés de *computed axial tomography*, y que funciona con rayos X), ya que actualmente hay técnicas como la resonancia magnética nuclear (NMR, por la sigla en inglés de *nuclear magnetic resonance*), la resonancia magnética funcional en imágenes (fMRI, por la sigla en inglés de *functional magnetic*

¹⁵³ Hay cinco fases del sueño; en la primera fase el cerebro hace que el corazón empiece a latir más lentamente y que disminuya ligeramente la temperatura del cuerpo. También envía mensajes a los músculos para relajarlos. En la segunda fase, el sueño es ligero y la persona puede despertarse a causa de un ruido o contacto con algo, pero si eso no sucede, pasa a la fase tres, que es un sueño profundo. El cerebro ordena que baje la presión arterial y la sensibilidad a la temperatura del ambiente. El sueño más profundo se produce en la fase cuatro, en la que algunas personas hablan dormidas o son sonámbulas y es difícil ser despertado. La última fase es la llamada fase de movimientos oculares rápidos (REM, por su sigla en inglés de *rapid eye movement*) porque aunque los músculos están totalmente relajados, los ojos se mueven rápidamente de un lado al otro y aumenta el ritmo cardíaco. Esta es la fase de los sueños. A medida que avanza la noche, se van repitiendo las fases dos, tres, cuatro y REM cada 90 minutos. Todas las personas tienen sueños, pero algunas no pueden recordarlos tan bien como otras. Algunos científicos creen que los sueños son la forma que tiene el cerebro de clasificar lo que sucede durante el día. Las cosas que son importantes quedan almacenadas en la memoria, y el resto desaparece.

resonance imaging) y la tomografía por emisión de positrones (PET, por la sigla en inglés de *positron emission tomography*), que nos muestran al cerebro mientras piensa (Cabrera 2004). La NMR y la fMRI permiten mostrar en imágenes las regiones cerebrales que ejecutan una tarea determinada, al detectar la dilatación de vasos arteriales y venosos microscópicos. Con la PET se ha podido medir la actividad metabólica de los diferentes tejidos del cuerpo humano, especialmente del sistema nervioso central, ya que se utiliza una sustancia radiactiva que atraviesa la barrera hematoencefálica y así se puede analizar el cerebro en tiempo real y obtener una imagen dimensional. Por medio de estas técnicas, ya han sido analizadas las regiones de las siguientes funciones cerebrales: movimientos de la mano, el pie, la boca, los ojos y la cara; sensaciones de dolor, sensibilidad superficial y profunda, sensación térmica, reconocimiento de formas por el tacto, vibración, gusto y olfato; recepción visual de luz destellante, formas, colores, movimiento y formas complejas; recepción auditiva de tonos, música, sonidos naturales, percepción estereofónica, localización del sonido, diferenciación de fondo y otras. Los datos más útiles, prácticos y promisorios obtenidos con estas técnicas son los relativos al lenguaje. Es posible mapear la capacidad de hablar y de comprender, así como la capacidad de discriminar, de categorizar y de recordar palabras. También se ha mapeado la memoria de corto plazo (reciente), la capacidad de recordar sitios, la habilidad de reconocer caras, de hacer operaciones matemáticas, de inhibir una respuesta automática y de cambiar el foco de atención. Incluso se ha explorado la activación cerebral relacionada con las preferencias políticas, las preferencias comerciales, la propensión a apostar y a decir mentiras (Raichle y Mintun 2006; Saykin 2007).

3. *Cómo aprende el cerebro*

Por experiencia propia sabemos que el cerebro puede aprender cosas nuevas, un proceso que se realiza por medio de las neuronas, células que forman parte del sistema nervioso. El sistema está compuesto de millones de estas células microscópicas y cada neurona tiene pequeñas ramificaciones que sobresalen y le permiten conectarse a otras neuronas. Estas conexiones o uniones especializadas se llaman “sinapsis” (del griego *sinapteína*: *sin-*, que significa “juntos”, y *hapteína*, que significa “con firmeza”) y permiten enviar señales de unas células a otras y a células no neuronales como las musculares o glandulares. Las sinapsis permiten a las neuronas del sistema nervioso central formar una red de circuitos neuronales. Son cruciales para los procesos biológicos que subyacen bajo la percepción y el pensamiento, y permiten que el sistema nervioso se conecte y controle a todos los demás sistemas del cuerpo. En las sinapsis se forman unas extensiones celulares con forma de hongo al final de cada célula nerviosa, y los extremos de ambas se aplastan uno contra otro. En esta zona, se envían señales de una célula a otra por medio de la difusión de sustancias llamadas neurotransmisores, que son de naturaleza química muy distinta. La liberación de neurotransmisores de una célula a otra es iniciada por la llegada de un impulso nervioso a una neurona, y al tocar los neurotransmisores liberados la célula contigua puede provocar dos tipos de estímulos, el excitatorio o el inhibitorio, dependiendo del tipo

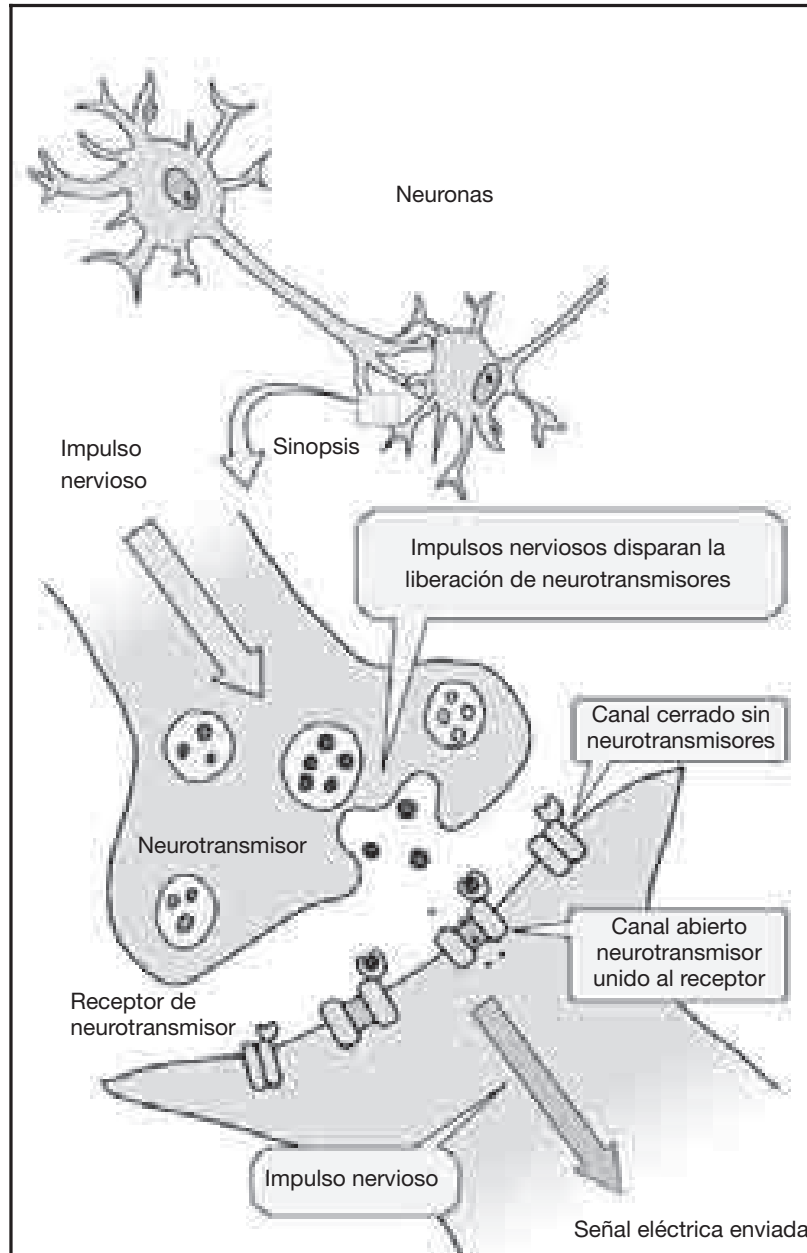
de receptores y neurotransmisores que intervienen en la sinapsis. Una vez enviada la señal, el neurotransmisor es rápidamente eliminado, con lo que se evita la desensibilización de las neuronas y se asegura que los estímulos subsiguientes funcionen con la misma intensidad. Los neurotransmisores naturales más conocidos son principalmente: acetilcolina, dopamina, norepinefrina y serotonina. La fuerza de la sinapsis puede disminuir si los estímulos llegan en una rápida sucesión.

En el gráfico 15.1 se muestra la caracterización de una sinapsis y la función de los neurotransmisores. No se puede negar una cierta similitud con el diseño de una puerta lógica de un sistema *booleano*, en el que una corriente electrónica ejecuta estímulos –excitatorios o inhibitorios– para realizar computaciones básicas entre dos compuertas lógicas, sean éstas construidas por puertas mecánicas, tubos de vacío o transistores hechos de silicio. Obviamente, ambos sistemas tienen diferencias significativas en su funcionamiento, dinamismo y modo de operación, y logran resultados muy diferentes, pero es evidente una cierta semejanza en el diseño básico.

Al nacer, el cerebro tiene todas las neuronas que siempre tendrá, pero muchas de ellas no están conectadas entre sí. El cerebro humano crece a un ritmo de 250.000 células por minuto en el feto y contiene un número inmenso de sinapsis, que en los niños alcanza un billón. Este número disminuye con el paso de los años, y se estabiliza en la edad adulta. Se estima que un adulto puede tener entre 100.000 y 500.000 millones de sinapsis (Mora, 2005).

Cuando se aprenden cosas, los mensajes van de una neurona a otra, una y otra vez hasta que finalmente el cerebro empieza a crear conexiones (o vías) para que las cosas sean más fáciles y se pueda hacerlas cada vez mejor. Cuando se monta por primera vez en bicicleta, el cerebro tiene que pensar en pedalear, permanecer en equilibrio, controlar el manubrio, vigilar la calle y frenar –todo a la vez. Es un trabajo difícil, pero con el tiempo y la práctica, muchas neuronas transmitieron mensajes entre sí y se conectaron hasta que se creó una vía en el cerebro. Una vez logrado eso, se puede montar en bicicleta sin pensarlo, porque las neuronas han creado con éxito la vía de “montar bicicleta”. El aprendizaje y el pensamiento son tareas biológicamente exigentes; implican el consumo de neuronas que requieren una cantidad significativa de neurotransmisores, y aun cuando éstos son reutilizables hasta cierto punto, son finalmente agotados y necesitan un tiempo de recuperación. Este agotamiento de neurotransmisores da lugar a un funcionamiento mental reducido, que puede incluir dificultad en la concentración, un razonamiento retardado, disminución en la eficacia del aprendizaje, deterioro de la memoria, coordinación reducida, poco o mal humor, problemas para enfrentar situaciones diversas, un aumento en los tiempos de reacción y fatiga mental. Esto también aumenta generalmente la probabilidad del error humano en las diversas tareas y actividades realizadas, lo que a su vez provoca estados de tensión y hace que los neurotransmisores se agoten más rápidamente. Los neurotransmisores del cerebro necesitan ser renovados con frecuencia por el cuerpo, a partir de las sustancias ingeridas en la dieta. El mantener las sustancias químicas que forman a los neurotransmisores en los niveles óptimos, tiene un efecto benéfico en el funcionamiento del cerebro, lo que implica una mayor agilidad mental y resistencia o capacidad de mantener un esfuerzo importante durante un período prolongado, incluso más

Gráfico 15.1
SINAPSIS Y FUNCIÓN DE LOS NEUROTRANSMISORES



allá de los límites normales del individuo. A medida que el cerebro envejece, declina también su capacidad de producir y mantener niveles juveniles de neurotransmisores, por lo que proveer al cerebro con las materias primas suficientes para hacer los neurotransmisores que necesita, puede restaurarlos a los niveles juveniles y ayudar así al mantenimiento de las funciones cognitivas a esos niveles (Stancheva y otros, 1991).

Una característica importante del cerebro es que no cualquier sustancia puede ingresar a su interior y sólo aquellas permitidas pueden atravesar la barrera hematoencefálica. Esta es una barrera que se encuentra entre los vasos sanguíneos y el sistema nervioso central e impide que muchas sustancias tóxicas la atraviesen. Sólo las moléculas más pequeñas (oxígeno, dióxido de carbono, etanol, nicotina y azúcares) pueden pasar por la barrera, y muchas drogas y otros tóxicos son por lo general demasiado grandes para atravesarla. Además, parece ser que algunas de estas sustancias –como la droga sintética llamada *éxtasis*– pueden dañar la barrera y hacerla más permeable. Esta barrera también protege al cerebro de infecciones, aunque hay algunos virus y bacterias capaces de atravesarla, como los responsables de rabia, meningitis, borreliosis o cólera (Audus y otros, 1992).

b. Drogas inteligentes, usos y sus efectos

Típicamente se presume que las drogas inteligentes sirven para fortalecer la producción de neuroquímicos (neurotransmisores, proteínas y hormonas) del cerebro, al mejorar la fuente de oxígeno o estimular el crecimiento de los nervios. Muchas de las sustancias propuestas como drogas inteligentes son alimentos o componentes de plantas (raíces, semillas, o cortezas), disponibles en el mostrador de los almacenes de alimentos naturales y de las tiendas de comestibles, y se utilizan como suplementos alimenticios. Algunas drogas inteligentes son usadas para tratar el retraso y degradación de los nervios, lo que sucede a causa de algunas enfermedades como el mal de Alzheimer y el mal de Parkinson. Estas drogas tienen una variedad de usos en humanos, se encuentran de manera abundante por medio de internet, y son utilizadas por mucha gente en regímenes cognitivos personales. Con algunas drogas inteligentes, los efectos son sutiles y graduales como con la mayoría de los inductores del crecimiento de los nervios, y pueden pasar semanas o aún meses antes de que se note cualquier mejora cognitiva. En el otro extremo del espectro están las drogas inteligentes que tienen efectos inmediatos, profundos y obvios. Mientras que los estudios científicos apoyan algunas de las ventajas que se proponen para ciertas drogas inteligentes, vale la pena mencionar que muchas de las propiedades atribuidas a una variedad de fármacos inteligentes no se han probado formalmente (Giancarlo y Giacomo, 1989).

Las “drogas inteligentes” son también conocidas como “nootrópicos” y son sustancias que elevan las capacidades cognitivas humanas, que son las funciones y las capacidades del cerebro. El término “nootrópico” (del griego *noús* que significa “mente”, y *trópos* que significa “movimiento”) fue acuñado por el doctor Cornelio E. Giurgea, quien dirigió a los científicos de la compañía farmacéutica belga UCB (Union Chimique Belge) en la síntesis del *piracetam* (Nootropil®, Myocalm®). Este producto fue lanzado clínicamente por UCB a principios de los años setenta y sigue siendo un producto importante de esa compañía en Europa. El *piracetam* incrementa los niveles de energía y acelera el metabolismo de las células del cerebro; también hace aumentar el intercambio de información entre los hemisferios derecho e izquierdo del cerebro. Además, acentúa la vigilancia, mejora la concentración y realza la memoria; protege las neuronas contra la falta de oxígeno y estimula el crecimien-

to de los receptores del neurotransmisor acetilcolina. Puede también regenerar los nervios (Giurgea 1982; Vernon y Sorkin, 1991; Gouliaev y Senning, 1994).

1. Estrategias generales de las drogas inteligentes

La depresión y el humor deprimido afectan negativamente el funcionamiento cognitivo. Las sensaciones de tristeza, culpabilidad, desamparo, desesperación, ansiedad y miedo causadas por la depresión afectan el pensamiento productivo, mientras que la apatía (que también es inducida por la depresión) es la carencia de la motivación y los humores motivantes (como la curiosidad, el interés o la determinación). Otros síntomas de la depresión incluyen patrones modificados del sueño, fatiga mental y pérdida de energía, problemas en la concentración y en la toma de decisiones, y un generalizado retraso y bloqueo de la cognición, incluyendo la memoria. Obviamente, la eliminación de estos efectos mejora la inteligencia y el funcionamiento mental y, por tanto, la disminución y la prevención de la depresión son eficaces estrategias nootrópicas. Hay una alta correlación entre la depresión y la reducción o agotamiento de los neurotransmisores en el cerebro, por tanto no es ninguna sorpresa que el aumento de la producción de neurotransmisores alivie la mayoría de las depresiones o por lo menos reduzca los síntomas. La tensión o estrés es otro factor importante en el agotamiento de los neurotransmisores –como causa y efecto, lo que crea un ciclo vicioso– por tanto, el correcto manejo de la tensión y de las sustancias antiestrés son también estrategias nootrópicas muy útiles (Schindler, Rush y Fielding, 1984).

La propiedad más notoria de muchas drogas inteligentes es que ayudan a la formación de los neurotransmisores. Proveen al cuerpo de los precursores y de los cofactores que necesita para producir los neurotransmisores naturales más conocidos como la acetilcolina, la dopamina, la norepinefrina y la serotonina. Mantienen altos los niveles de estos neurotransmisores en el cerebro, y como consecuencia mejoran la concentración, el enfoque mental, la capacidad de cálculo, la codificación de la memoria, la creatividad, el humor y curan y previenen la mayoría de las depresiones. El ejercicio cardiovascular realizado sobre una base regular también tiene efectos nootrópicos, y mejora la capacidad del cuerpo de proveer de oxígeno a las células del cerebro. El ejercicio es altamente sinérgico con un aporte alimenticio adecuado, y cualquier régimen de salud está incompleto sin él. Las drogas inteligentes están generalmente disponibles sólo por prescripción médica o para uso personal. Otras sustancias propuestas como nootrópicas son suplementos alimenticios o componentes de plantas, que se ofrecen en los almacenes y tiendas de comestibles. El término “droga” aquí se utiliza como designación legal, y no indica mayor eficacia. Los efectos, la eficacia y la potencia de las drogas inteligentes, varían de sustancia a sustancia y de individuo a individuo (Giancarlo y Giacomo 1989; Ruiz-Franco, 2005).

En este sentido, una droga inteligente no necesariamente tiene que ser un medicamento derivado de un largo y complejo proceso de producción farmacéutica. La noción azteca del cacao como planta medicinal no es reciente, pero hoy en la ciencia estamos volviendo a descubrir la poderosa naturaleza de las frutas, de los vegetales y de las semillas del cacao. Estos alimentos son una rica fuente de vitaminas, de minerales

y de antioxidantes llamados polifenoles. En un estudio de la Universidad de California en Davis se evaluaron los efectos de los polifenoles del chocolate en la función de las plaquetas de la sangre. Consumir cacao tenía el mismo efecto que la aspirina, que era la reducción en la agregación de las plaquetas; los autores creyeron que este fenómeno podría ser cardioprotector (Waterhouse, Shirley y Donovan, 1996). La razón por la que mucha gente anhela comer chocolate puede ser su efecto sobre el sistema nervioso central. De los 300 compuestos del chocolate, varios son productos químicos que alteran el cerebro con la capacidad de reducir la depresión en algunas personas y de crear un sentido de euforia en otras. Dos compuestos son responsables de estos efectos, la feniletilamina y la anandamida. La primera es un ingrediente predominante en el chocolate, muy similar a la anfetamina; ambos son estimulantes del cerebro y están naturalmente presentes en nuestros cerebros. Si se toma en dosis inusualmente altas, la feniletilamina puede causar el mismo efecto que las anfetaminas (regocijo, disminución de la fatiga y un sentido general de bienestar). La anandamida es un mensajero químico en el cerebro que reconoce a los mismos receptores activados por el componente activo de la marihuana. Sus efectos farmacológicos se han ligado al control de la cognición, del humor, de la memoria y del dolor. El chocolate también tiene una variedad de compuestos como la cafeína, la teobromina y la teofilina presentes también en el café y el té. Todos estos estimulantes hacen aumentar la producción de neurotransmisores y con ello la actividad química del cerebro; por eso es que se siente una inyección de energía al comer chocolate. (Lee y Balick, 2001).

2. Tipos de drogas inteligentes

Las drogas inteligentes colinérgicas son sustancias que afectan el neurotransmisor acetilcolina o los componentes del sistema nervioso que utilizan la acetilcolina. Este neurotransmisor facilita la memoria, la concentración, el enfoque y los procesos de alta categoría del pensamiento (pensamiento abstracto, cálculo, innovación, entre otros). En general, un aumento en la disponibilidad de este neurotransmisor en el cerebro puede mejorar estas funciones y prolongar su duración sin que se retrasen o detengan. Por estos motivos, las drogas inteligentes se clasificaron inicialmente de acuerdo con el neurotransmisor que promueven y se pueden dividir principalmente en colinérgicas, dopaminérgicas (incluye precursores de norepinefrina) y serotoninérgicas en general. Sin embargo, existen otras sustancias que actúan como drogas inteligentes pero que no tienen una aparente relación directa con estos neurotransmisores, como se verá posteriormente en el caso de la neurología cosmética y los bionootrópicos moleculares (Pepeu y Spignoli, 1989; Cragg, Newman y Snader, 1997; Newman, Cragg y Snader, 2003).

Colinérgicas. Las drogas inteligentes colinérgicas incluyen precursores o factores para producir la acetilcolina, e inhibidores de los factores que rompen la acetilcolina como la enzima acetilcolinesterasa, lo que hace que se evite la degradación de ese neurotransmisor (Funk y Schmidt, 1988; Zangara, 2003; Malik y otros, 2007). Cabe destacar que una saturación del cerebro con acetilcolina puede tener el efecto opuesto, reduciendo más que mejorando temporalmente el funcionamiento mental.

Recuadro 15.1**ALGUNOS EJEMPLOS DE DROGAS INTELIGENTES COLINÉRGICAS**

Acetil-L-carnitina (ALCAR). Es un aminoácido precursor de la acetilcolina.

Colina. Precursor de la acetilcolina, nootrópico general y antidepresivo.

Alfa-GPC (glicerilfosforilcolina, colina alfoscerato). Cruza fácilmente la barrera hematoencefálica.

CDP-colina (citidin difosfato de colina). Puede ser menos costoso y similar a la alfa GPC en su efecto.

Lecitina. Precursor de la acetilcolina.

Vitamina B5 (Ácido pantoténico). Ayuda en la conversión de la colina al neurotransmisor, aumenta la resistencia (incluyendo la resistencia mental).

Centrofenoxina (Meclofenoxate, Lucidril®). Considerado como droga. Es un agente colinérgico que realza la percepción de los colores.

L-Huperzina A. Es un potente inhibidor de la acetilcolinesterasa, derivado del musgo chino club (*Huperzia serrata*, musgo de la familia de las lycopodiáceas; también conocido como *Lycopodium squarrosum*).

DMAE (dimetilaminoetanol, dimetiletanolamina). Se usa en el tratamiento para el trastorno por déficit de atención con hiperactividad (TDAH, también conocido como ADD/ADHD por su sigla en inglés), es precursor de la acetilcolina y es antidepresivo. Quita la lipofuscina del cerebro que está formada por gránulos de pigmento color marrón, compuesto de lípidos comúnmente asociados con el envejecimiento de los tejidos. Una acumulación anormal de lipofuscina se asocia con enfermedades neurodegenerativas.

Piracetam (Nootropil®, Myocalm®). Fue la primera droga inteligente y probablemente la más comúnmente tomada.

Aniracetam (Draganon®, Sarpul®) - Droga. Análogo del piracetam pero es 4 a 8 veces más potente.

Etiracetam. Mejora el nivel de atención.

Nefiracetam. Droga análoga del piracetam, que facilita la neurotransmisión hipocampal.

Oxiracetam - Droga. Análogo del piracetam pero 2 a 4 veces más fuerte. Mejora la memoria, la concentración y el nivel de atención. Cuando se dio como alimento a las ratas preñadas, las crías de esas ratas eran más inteligentes que las de ratas alimentadas con un placebo de solución salina.

Pramiracetam (Neupramir®, Pramistar®). Droga. Análogo del piracetam pero de 8 a 30 veces más fuerte.

Recuadro 15.2**ALGUNOS EJEMPLOS DE DROGAS INTELIGENTES
CONOCIDAS COMO DOPAMINÉRGICAS**

L-DOPA (Levodopa (INN)). Droga que debe suministrarse sólo con receta. Precursor del neurotransmisor dopamina, nootrópico general y antidepresivo.

Fenilalanina y *tiroxina* (requieren la vitamina B6 y la vitamina C). Son aminoácidos esenciales. Precursores de la dopamina y de la norepinefrina; drogas inteligentes generales, antidepresivos y reductores del sueño.

Teanina. Es un aminoácido derivado de la glutamina y se encuentra en el té. Eleva los niveles de dopamina y serotonina en el cerebro. Promueve la producción de ondas alfa del cerebro asociadas con un estado de relajación de la atención.

Vitamina C (ácido ascórbico). Mejora la elasticidad e integridad cardiovascular, estabiliza la membrana y funciona como un importante antioxidante (protege las células del cerebro y previene su muerte), interviene en la producción de los neurotransmisores dopamina y serotonina.

Vitamina B6 (piridoxina). Es una vitamina utilizada para producir la dopamina.

Yohimbina (quebraquina, afrodina, corinina, yohimvetol e hidroergotocina). Principal alcaloide del árbol “yohimbe” (*Pausinystalia yohimbe*) que es un árbol perenne alto, originario del sur de Nigeria, Camerún, Gabón y Congo. Se considera que la tintura de la corteza eleva 80% los niveles de dopamina, aunque aún no se sabe cómo. También se usa como afrodisíaco porque evita la disfunción eréctil masculina. El yohimbe representa algunos riesgos para la salud por sus efectos secundarios: es un neuroparalítico que retrasa la respiración e induce la acidosis, algunos síntomas de esto son malestar, náusea y vómito. Contraindicado para usuarios de megadosis de vitaminas ácidas o nutrientes.

Deprenyl (Selegiline, l-deprenyl, Eldepryl®, Anipryl®). Bloquea la enzima que rompe la dopamina, por lo que eleva su nivel mejor y más rápidamente que otras drogas.

Recuadro 15.3**ALGUNOS EJEMPLOS DE DROGAS INTELIGENTES SEROTONÉRGICAS**

5-HTP (5-hidroxitriptófano). El organismo humano usa el 5-HTP para sintetizar serotonina. Es la forma más disponible de triptófano, precursor del neurotransmisor serotonina; promueve el sueño equilibrado y relajado. La semilla de *Griffonia simplicifolia*, que es una planta medicinal de África occidental, es una fuente natural de 5-HTP (una alternativa en los países donde el 5-HTP no es legal).

Teanina. Ya mencionado como un aminoácido derivado de la glutamina que se encuentra en el té. Eleva los niveles de dopamina y serotonina en el cerebro.

PRESENTACIÓN COMERCIAL DE DIVERSAS DROGAS INTELIGENTES



Dopaminérgicos. Las drogas inteligentes conocidas como dopaminérgicos son las sustancias que afectan el neurotransmisor dopamina o los componentes del sistema nervioso que utilizan la dopamina. Esta se produce durante la síntesis de todos los neurotransmisores de catecolamina, y es el paso limitante para esta síntesis. Las drogas inteligentes conocidas como dopaminérgicos incluyen precursores y cofactores de la dopamina, y los inhibidores de la reabsorción de la dopamina (Westermann, Schmidt y Bucher, 1981; Elaine, 2007).

Serotonérgicas. Las drogas inteligentes serotonérgicas son sustancias que afectan el neurotransmisor serotonina o los componentes del sistema nervioso que utilizan la serotonina. Las drogas inteligentes serotonérgicas incluyen precursores y cofactores de serotonina, y los inhibidores de la reabsorción de la serotonina (Weingartner, 1985; Hatakeyama 2005).

Triptófano (requiere la vitamina B6 y la vitamina C). Es un aminoácido esencial. Precursor de la serotonina, encontrado en alta concentración en los plátanos y las aves de corral (especialmente el pavo), también en la leche. Promueve el sueño equilibrado y relajado. La investigación sobre este tipo de sustancias continúa y se han detectado más sustancias naturales definidas y aisladas que tienen un efecto nootrópico. La fisetina, por ejemplo, es una sustancia natural encontrada comúnmente en las fresas y otras frutas y vegetales; estimula la memoria a largo plazo y también desempeña un papel en

el proceso de la formación de la memoria llamado “potenciación a largo plazo” o LTP, por su sigla en inglés. Estas sustancias indujeron la diferenciación o la maduración de células de los nervios, y puede ser que no sólo protejan a las células nerviosas de morir sino que podrían además promover nuevas conexiones entre ellas (Kumar, 2006; Maher, Akaishi y Abe, 2006; Ozelli, 2007).

c. Genómica de la mente

No sólo las drogas inteligentes pueden afectar las funciones cognitivas; los genes mismos que influyen en la estructura y función del cerebro, pueden jugar un papel determinante en el futuro de las funciones y capacidades cognitivas de la mente humana. Las diferencias genéticas entre un mono y un ser humano son absurdamente escasas, pero tienen una extraordinaria importancia. Sin ellas no habría lenguaje, ni pensamiento abstracto, ni ciencia, ni sentido moral, ni poesía. De alguna forma la esencia humana debe estar contenida en unos cuantos cambios de bases en el texto del ADN, y encontrarlas es uno de los problemas más interesantes a los que se enfrenta la biología evolutiva. Aunque el genoma humano tiene más de 3.000 millones de bases, las primeras claves han aparecido recientemente e indican que el tamaño del cerebro puede ser uno de los factores determinantes. Las personas y los chimpancés éramos la misma especie hace seis millones de años. Por alguna razón desconocida, esa especie se dividió en dos: una quedó más o menos como estaba, dando lugar a los actuales chimpancés, y la otra evolucionó –entre otras cosas– con un crecimiento explosivo del cerebro; de aproximadamente 500 cm³ en el australopiteco, a 1.000 cm³ en el *homo erectus* y a 1.500 cm³ en el *homo sapiens* (Varki y Altheide, 2005; Wetterbom y otros, 2006).

El hecho de que los genes y las proteínas influyen en el desempeño cognitivo, significa que existe la posibilidad de utilizar la ingeniería genética, la biología molecular y la biotecnología para buscar genes que puedan ser manipulados con el fin de modificar las capacidades del cerebro. Esto abre toda una nueva era de investigación dirigida a la búsqueda de los receptores de estas proteínas y formas de modificar su interacción.

1. Ingeniería genética

Para poder entender los avances actuales en las técnicas de la ingeniería genética que apuntan a la amplificación de la inteligencia biológica, es indispensable revisar brevemente algunos conceptos básicos. Todos los organismos de este planeta están formados por células que contienen principalmente proteínas y las proteínas están formadas por aminoácidos; todos estos son compuestos biológicos que nos permiten vivir. Hay miles de proteínas para todas las funciones que debemos realizar, y esas proteínas nos ayudan a producir los azúcares, grasas, hormonas y demás sustancias biológicas que requerimos a lo largo de la vida. Incluso nos ayudan a convertir en aminoácidos otras proteínas animales o vegetales que ingerimos para nutrarnos. Es imposible que tengamos un almacén de todas las proteínas y aminoácidos que nece-

sitamos y en la cantidad adecuada para permitir la vida por tiempos largos. El secreto de cómo fabricamos nuestras propias proteínas está en el material genético de los organismos y principalmente en el ADN o ácido desoxirribonucleico. Éste constituye el principal componente del material genético de la inmensa mayoría de los organismos.

El ADN es el material del que están hechos los genes y el principal componente químico de los cromosomas. La estructura del ADN le permite funcionar como el programa básico o el “*software*” biológico que codifica y contiene las instrucciones esenciales para fabricar un ser vivo idéntico a aquel del que proviene, o muy similar si se combina con otro ADN, como sucede durante la reproducción sexual. La función principal del ADN es heredar las características biológicas del organismo original y por tanto conservar la descendencia. La especificación de las proteínas que necesita cada organismo para desarrollarse adecuadamente depende de su ADN, el cual dirige la producción y formación de esas proteínas. Por eso es que uno de los principales descubrimientos del ser humano ha sido la elucidación de la estructura del ADN. Esta estructura es una doble hélice que permite al ADN “desenrollarse” o abrirse para que sea posible su duplicación, haciendo una copia exacta por la especificidad de las parejas de bases mencionadas. Fundamentalmente, entre los componentes del ADN, cada *adenina* de una hebra hace pareja con una *timina* de la otra, y cada *citocina* con una *guanina*. Con esta estructura de doble hélice se pueden explicar las propiedades que le permiten al ADN heredar las características de los padres y que son (Watson y Crick, 2003): capacidad para contener información en el lenguaje codificado en la secuencia de bases químicas; capacidad de replicación para dar origen a dos copias iguales; capacidad de mutación o cambio de la secuencia de las bases químicas que permite y justifica los cambios evolutivos.

Dentro del material genético de los organismos, existe otro tipo muy similar al ADN que convierte la información del ADN en proteínas. Sólo tiene una cadena de bases y en lugar de *timina* usa *uracilo*, un material al que se llama ARN o ácido ribonucleico. Así, como eje central de la biología molecular se plantea que el intercambio de actividad y de información es desde el ADN, y pasa por diferentes ARN a la proteína. Un gen está formado por un fragmento de la doble cadena de ADN y contiene miles de bases químicas. Esa es la información necesaria para fabricar una proteína, que a su vez contiene una cadena de cientos de aminoácidos unidos en una secuencia específica. En el código genético hay muchos sinónimos, es decir, distintas secuencias de tres bases pueden codificar el mismo aminoácido, lo que le permite cierta flexibilidad al sistema y garantiza la producción de las proteínas independientemente de la cantidad de aminoácidos específicos que adquirimos en los alimentos (Jeremy, Tymoczko y Stryer, 2002).

Las mutaciones son cambios de bases químicas en el ADN y ocurren más o menos al azar. Unas provocan cambios de aminoácidos en la proteína, pero otras no, porque sustituyen la antigua secuencia de tres bases por otra cualquiera de sus sinónimos. Cuando un gen se limita a variar erráticamente a lo largo del tiempo, muchos de sus cambios de bases en el ADN no tienen el menor efecto en la proteína (son cambios *silenciosos*). Pero cuando el ambiente circundante o las condiciones de vida se modi-

fican por un cambio del clima, por agresiones de otros organismos, efectos de sustancias extrañas, rayos cósmicos o cualquier otro factor externo, se pueden producir cambios más frecuentes en la secuencia de bases del ADN. Si un gen ha estado sometido a la selección natural darwiniana por alguno de estos factores, las variantes ventajosas (que necesariamente deben cambiar aminoácidos) y que le permiten al organismo sobrevivir en esas nuevas condiciones, se habrán impuesto en la población y habrán eliminado a casi todas las demás mutaciones que no le permitieron al organismo adaptarse al cambio (incluidas las *silenciosas*). Los descendientes que contengan esos cambios ventajosos sobrevivirán y perpetuarán la especie, de lo contrario ésta se extinguirá por no haberse adaptado a la selección natural.

De esta manera, como el ADN se copia a sí mismo, es un almacén de datos que se transmite de una generación a otra, y que contiene toda la información necesaria para construir y sostener el organismo en el que reside; además, permite que se produzcan cambios que le pueden dar una ventaja de supervivencia por medio de la adaptación al organismo seleccionado (Jeremy, Tymoczko y Stryer, 2002).

Una vez entendidos estos conceptos, en la biología molecular y la biotecnología modernas se han desarrollado herramientas biológicas y métodos experimentales controlados, que posibilitan modificar a voluntad la información genética de cualquier organismo. Las técnicas principales para realizar estas modificaciones son la ingeniería genética, que nos permite extraer el ADN de un organismo y manipularlo artificialmente para insertar, quitar o modificar la secuencia de bases químicas de cualquier gen, y la transformación genética estable y heredable, por medio de la cual se pueden introducir eficaz y funcionalmente los genes modificados a casi cualquier organismo, sin importar si el gen original era de un organismo completamente distinto del receptor. Así, se pueden aislar genes de una bacteria, modificarlos a voluntad e incorporarlos a diversos animales o plantas y viceversa. De esta forma se ha logrado crear bacterias que producen insulina –que es una hormona exclusiva de animales superiores y sirve para tratar la diabetes– y plantas de algodón y de maíz con genes de bacterias que fortalecen a las plantas frente a los ataques de insectos (Strauss, 2003; Glick y Pasternak, 2003).

Con la sofisticación de estas técnicas y la ayuda de la nanotecnología, se ha iniciado la era genómica que nos permite ahora conocer la secuencia exacta de todas las bases químicas de cualquier organismo. En febrero de 2001, se produjo el avance más importante en el estudio de la genética, y uno de los más significativos para nuestra especie: la creación de un mapa del genoma humano (Venter y otros, 2001). Esto nos permitirá identificar a los genes que están relacionados con ciertas enfermedades; saber la forma en que nuestro organismo reaccionará a ciertas sustancias; conocer si existe la posibilidad de que nuestros hijos y nietos hereden enfermedades específicas; diseñar medicamentos particulares para cada ser humano dependiendo de su información genética, entre otras opciones (McKusick, 1989; Amadio y Walsh, 2006). Este tipo de descubrimientos facilitará la comprensión del lenguaje del código genético humano y, por tanto, su intervención (Pelzer, Vente y Bechthold, 2005; Dobson, 2006; Montaldo, 2006; Elgersma, 2007). Esto también significa que la lucha por controlar los códigos genéticos ya se inició. En 1991, la dirección de patentes de Estados Unidos

recibió 4.000 solicitudes relacionadas con el campo de la genética. En 1996, este número aumentó a 500.000. Una empresa, Humane Genome Sciences, ha obtenido patentes de 106 genes humanos, incluso algunos que son clave para curar la osteoporosis y la artritis.

2. *Bionootrópicos moleculares*

Un factor diferente a las drogas inteligentes previamente revisadas, que son primordialmente sustancias químicas simples –ya sean naturales como los aminoácidos o sintetizadas químicamente como la mayoría de las descritas hasta ahora– son las sustancias complejas de origen biológico como las proteínas, y que son capaces de controlar las funciones cognitivas. Con el avance de la biología en general, se han empezado a entender los mecanismos de control de la expresión de genes que tienen influencia en ciertas funciones metabólicas.

Un buen ejemplo son los factores CREB (por su sigla en inglés de “*camp response element-binding*”). Los CREB pertenecen a un tipo de proteínas llamadas “factores de transcripción”, que tienen la capacidad de unirse directamente al ADN y regular la expresión o manifestación de un gen particular. Los CREB están involucrados en la formación de la memoria de largo plazo, y moduladores de los CREB aparentemente ayudan a olvidar los malos recuerdos, con los que se confirma que la memoria es un proceso que requiere de la síntesis de proteínas (Nader, Schafe y Le Doux, 2000; Chatterjee, 2004).

También se ha descubierto una proteína llamada “quinasa M zeta” que está vinculada al mantenimiento de la memoria. En Bliss, Collingridge y Laroche (2006) se demuestra que mediante la inhibición de la función de esta proteína, se pueden borrar los recuerdos almacenados en la memoria a largo plazo. El borrado de la memoria efectuado de esta manera no afecta a la capacidad del cerebro de adquirir nuevos recuerdos. El sistema sería “parecido” a cuando se borra parte del disco duro de una computadora y luego se usa ese espacio para almacenar nueva información. Esta proteína conserva la memoria a largo plazo a través un refuerzo persistente de las conexiones sinápticas entre las neuronas. Al inhibir la proteína, los científicos fueron capaces de borrar los recuerdos almacenados en un día o incluso en un mes. La función de esta proteína en el almacenamiento de la memoria es específica, porque al inhibir otras similares no se obtienen los mismos resultados. La identificación del mecanismo molecular central de la memoria a largo plazo podría hacer que se concentren las investigaciones en el desarrollo de nuevos agentes farmacológicos que fortalezcan la memoria y así tratar o prevenir los trastornos producidos por la pérdida de recuerdos asociados, por ejemplo, con el mal de Alzheimer.

3. *Genes de la mente*

Se ha demostrado que existe un gen clave en la evolución de la mente que permitió el crecimiento explosivo del cerebro en el linaje de los homínidos, gracias a la selección darwiniana (Mekel-Bobrov y otros, 2005). A ese gen se le ha llamado ASPM (por

su sigla en inglés de *abnormal spindle-like microcephaly associated*). Cuando los genes responsables del crecimiento del cerebro en el feto y el niño tienen errores (mutaciones), se produciría una drástica disminución del tamaño de ese órgano, y eso es exactamente lo que pasa en una malformación congénita llamada microcefalia.

El gen *ASPM* es uno de los cinco cuyas mutaciones causan microcefalia en humanos. Ya se ha secuenciado, es decir, se ha determinado el orden exacto de las bases de este gen en el ADN en siete especies de primates actuales, incluida la nuestra. El gen *ASPM* humano es muy similar al del chimpancé, menos similar al del gorila, y menos aún al del más distante orangután, y así sucesivamente. Los datos demuestran que este gen ha estado sometido a selección natural durante los últimos 18 millones de años, y a una selección particularmente intensa en los últimos seis millones. La explicación más simple es que el gen *ASPM* es un determinante esencial del tamaño del cerebro, que algunas de sus mutaciones son capaces de hacerlo crecer aún más, y que esas mutaciones conferirían tal ventaja a los homínidos que las portaban, que se impusieron en sucesivas oleadas en la población de nuestros antepasados. Hoy, la pérdida de la función de este gen provoca microcefalia: un atavismo que devuelve el cerebro humano al tamaño típico del de un australopiteco.

La evolución del gen *ASPM* en los últimos 18 millones de años comprende varias docenas de cambios de aminoácido en la proteína, y esos cambios no ocurrieron todos a la vez, sino de uno en uno; por tanto, cada cambio pudo hacer una pequeña contribución al aumento evolutivo del tamaño del cerebro. Sin embargo, en los humanos actuales que llevan mutaciones en *ASPM*, la función del gen afecta la estructura que distribuye los cromosomas en cada ciclo de división celular llamada “huso acromático”. Esa es probablemente la clave de su papel en la evolución de los homínidos. Durante el desarrollo del embrión humano, las células progenitoras del cerebro pueden adoptar dos modos de división: el simétrico, que produce dos nuevas células progenitoras, y el asimétrico, que genera una sola célula progenitora y una neurona diferenciada, que ya no se divide más. Si el modo simétrico ocurre más, se producen muchas más células progenitoras, y por tanto un cerebro mucho mayor. Quien decide si la división es simétrica o asimétrica es el huso acromático y ahí es donde seguramente actúa el *ASPM* (Evans y otros, 2004).

Una pregunta en debate es por qué el gen *ASPM* no ha causado incrementos explosivos del tamaño del cerebro en otros linajes animales, como los insectos. Sólo se puede especular que la presión selectiva para incrementar el tamaño del cerebro ha debido ser mucho más fuerte en la evolución humana. Una vez iniciada en nuestros primeros ancestros por algún accidente, después se habría disparado una selección natural por cerebros cada vez mayores y mejores.

Otro gen al que se atribuye la propiedad de alargar la vida también podría ayudar a preservar la memoria y a prevenir la enfermedad de Alzheimer. Un estudio reciente en personas de entre 95 y 107 años de edad mostró que aquellos que tenían el “gen de la longevidad”, también tenían el doble de probabilidades de tener una buena función mental y con menos señales de demencia, que los que carecían de este gen. En otro grupo de estudio con personas de entre 75 y 85 años, se encontró que había cinco veces más posibilidades de que este gen estuviera presente en personas que no desa-

rollaban demencia. El gen de la longevidad parece estar relacionado a una vida más larga, y a mejores memorias. Los investigadores afirman que la variante del gen, conocida como CETP VV, altera una proteína que transporta colesterol y que afecta el tamaño del colesterol “bueno” y del “malo” (Andrikopoulos y otros, 2004).

La enfermedad de Alzheimer es una enfermedad neurodegenerativa, que se manifiesta como deterioro cognitivo y trastornos conductuales. Se caracteriza en su forma típica por una pérdida progresiva de la memoria y de otras capacidades mentales, a medida que las células nerviosas (neuronas) mueren y diferentes zonas del cerebro se atrofian. La enfermedad suele tener una duración media aproximada de entre 10 y 12 años, aunque esto puede variar mucho de un paciente a otro. Las causas del trastorno no han sido completamente descubiertas, aunque se han relacionado con una acumulación anormal de las proteínas beta-amiloide y tau en el cerebro de los enfermos. La proteína beta-amiloide es el principal componente de las placas amiloides presentes en el tejido cerebral de pacientes que sufren el mal; las proteínas tau abundan en las neuronas, y su principal función es la estabilización de las extensiones de estas células. En algunos pacientes, la enfermedad de Alzheimer se produce por la aparición de mutaciones en los genes *PSEN1*, *PSEN2* y *APP*. *PSEN1* y 2 son los genes responsables de la producción de las proteínas conocidas como presenilinas. Estos genes están localizados en los cromosomas 14 y 1 del ser humano, y las presenilinas pertenecen a una familia de proteínas que pueden atravesar membranas. Mutaciones en los genes de estas proteínas causan los síntomas tempranos del Alzheimer aunque aún no se conoce el mecanismo que lo provoca. La proteína precursora amiloidea (*APP*, por su sigla en inglés de *amyloid precursor protein*) es una proteína que está concentrada en la sinapsis entre neuronas; aunque su función no ha sido dilucidada, es conocida por ser la precursora del beta-amiloide. En este caso la enfermedad aparece en épocas tempranas de la vida y se transmite de padres a hijos (por lo que existe habitualmente historia familiar de enfermedad de Alzheimer en edades precoces) (Fuentes y Slachevsky, 2005; Shawn y otros, 2006; Hoyer y Riederer, 2007).

d. Conclusiones y aspectos éticos

El mundo está lleno de tabúes, cosas de las que no se puede hablar y palabras que no se pueden decir. El tema de las drogas es uno de ellos. En 1798, la vacuna contra la viruela descubierta por Edgard Jenner fue denunciada como una técnica innatural e inmoral y como instrumento que cuestionaba la voluntad de Dios (Dickson, 1898). El uso de anestésicos fue considerado innatural hasta que la reina Victoria se atrevió a utilizarlo en un parto a mediados del siglo XIX. La ausencia de información abierta, sin cortapisas, es uno de los factores que contribuyen a que el tema de las drogas sea un problema social y de salud.

Con las drogas inteligentes –debido a que los supuestos efectos de un incremento cognitivo podrían ser varios, como mejoras en la memoria, capacidad de aprendizaje, atención, concentración, razonamiento, habilidades sociales, toma de decisiones, planificación, entre otros– sucede algo parecido que con las plantas, los alimentos y los fármacos útiles para mejorar nuestra salud y nuestro rendimiento. La información es-

casea y tenemos que acudir a libros sobre nutrición y vitaminas en general, porque los profesionales de la medicina parecen reservarse un conocimiento que sin duda representa poder. No obstante, hay muchas personas que quieren mejorar su rendimiento físico e intelectual, y que prueban una u otra sustancia al azar o fiándose de los rumores. Por eso, bastantes deportistas acaban consumiendo sustancias dopantes sin saber que hay otras menos perjudiciales con las mismas propiedades ergogénicas. Del mismo modo, los estudiantes pretenden consumir otro tipo de estimulantes para aumentar su capacidad de retención o simplemente para no dormirse, y en nuestra época adquieren lo que ven anunciado o lo que les ofrecen el farmacéutico y el dueño de la tienda de dietética. Ante este panorama, los que usan el cerebro en su trabajo y las personas con afán de autosuperación buscan algún sitio en internet donde asesorarse acerca de productos que apenas conocen –como las drogas inteligentes– y que ayudan a estimular la mente sin efectos secundarios (Ruiz-Franco, 2005).

Así, las drogas inteligentes reforzadoras de la memoria podrían ser utilizadas para mejorar las capacidades de estudiantes, empleados que lo requieran para sus trabajos, y personas en general (Gazzaniga, 2005). Estas sustancias se proponen como útiles para facilitar el aprendizaje del lenguaje o de otros idiomas. Lo mismo sucederá muy probablemente con la biología, ya que podríamos acelerar la incorporación del conocimiento, al vigorizar la evolución del cerebro y de sus capacidades para adquirir y procesar esa información.

1. Neurología cosmética

Esta búsqueda ha llevado a desarrollar el concepto de “neurología cosmética”. Un claro ejemplo de esto es el uso de derivados de la toxina botulínica tipo A (Botox®, Dysport®) producida por la bacteria *Clostridium botulinum*, que es uno de los venenos naturales más potentes conocidos y que paraliza los músculos. Por esta razón se usa comercialmente en cirugía plástica sin bisturí para quitar las arrugas. Se sabe también que el Botox tiene un efecto neurológico, ya que bloquea la liberación del neuroquímico acetilcolina de las neuronas, con las consecuencias respectivas (Fagien, 2004; Davletov, Bajohrs y Binz, 2005). La ampakina CX717 es un compuesto creado en 1993 por el doctor Gary Lynch en la Universidad de California en Irvine y desarrollado posteriormente por Cortex Pharmaceuticals. Fue creada para explorar posibles aplicaciones, ya que este compuesto afecta al neurotransmisor glutamato, y mejora la memoria y el desempeño cognitivo. La fórmula exacta se mantiene en secreto hasta el momento (Lynch, 2006). Otros estudios apuntan a la influencia de drogas inteligentes en el comportamiento social de animales; parece ser que algunos de ellos pueden modular específicamente la capacidad de reconocimiento entre sí (Perio y otros, 1989).

También se ha informado ampliamente del uso recreativo de prescripciones farmacológicas por parte de músicos, cantantes o gente que debe hablar en público. Estas personas toman sustancias con el fin de aminorar el terror escénico, pero en realidad se trata de fármacos para el corazón llamados betabloqueadores, como el propranolol (Inderal®), que permiten modificar la memoria de eventos con mucha

Recuadro 15.4**PERSPECTIVAS Y FANTASÍAS SOBRE POSIBLES HECHOS DEL FUTURO**

6 de junio de 2025

7:30 a.m. El despertador ya se apagó y me siento de lo mejor. Gracias al “Reposinex”, he tenido cuatro horas de profundo y reparador sueño. En cuanto mi cabeza tocó la almohada, ¡bum!, caí en un sueño de lentas ondas delta. Una vez en mi auto, camino al trabajo, tomé un “Realiza-latte”. Me encantan estas cosas, porque sensibilizan mis receptores de dopamina, modifican mis niveles MAO y ajustan los de noradrenalina. No tengo distracciones y mi concentración está de lo más aguda. Por lo general, manejar me pone tenso, ya que hace algunos años estuve involucrado en un feo accidente. Sin embargo, gracias a algunas cosas buenas que me recetó el doctor, el trauma no me afectó. Aún recuerdo el accidente, pero ya no hay malos recuerdos. No soy uno más de esos humanos primarios, soy un humano con completo control de la química de mi cerebro.

11:15 a.m. Cinco proyectos, diez fechas terminales, un incontable número de cálculos de ingeniería. Y yo estoy inmerso y en control de todo esto. Desde que empecé a tomar un aumentador cognitivo, parece que no se me olvida nada, y mi mente funciona mucho más rápido. Parece que mi jefe no se da cuenta totalmente, pero eso no me molesta en lo absoluto. “Emoceuticals” (me encantan estas cosas también) me calman como el Zen, pero aún puedo distinguir las cosas importantes. Cuando yo buscaba desesperadamente un cigarro (que era mi recurso en el pasado en casos de tensión) no podía hacer nada bien. Con la vacuna contra la nicotina, no hay forma de que eso pueda suceder otra vez.

5:50 p.m. Estoy manejando de regreso a casa, y una senadora está hablando en la radio. Yo apoyo su discurso sobre los psicofármacos. ¿Tenemos o no el derecho a saber si nuestros gobernantes están tomando empatógenos y reductores de avaricia como se supone que lo están haciendo? (El término “empatógeno” fue creado en 1983 por Ralph Metzner para describir agentes químicos que inducen sentimientos de empatía, o la capacidad de sentir y comprender los sentimientos de otra persona en un momento dado). Mi esposa trabajará hasta tarde esta noche, y yo estoy con los niños en casa. Los amo, pero a veces mi paciencia se agota con ellos; sin embargo, con los betabloqueadores avanzados que tomo evito que me dé un berrinche. Antes de ir a la cama, rezamos. Honestamente, yo no era creyente pero con una pequeña píldora blanca de enteógeno, siento sin conocer o asociar con alguna figura en particular, una presencia tranquilizante. Es una sensación confortable. (*El término “enteógeno”, significa en sentido estricto una sustancia psicoactiva, generalmente un extracto de plantas con propiedades alucinógenas, que permiten tener sensaciones de iluminación espiritual o místicas.*)

7 de junio de 2025

8:00 p.m. Salimos a cenar mi esposa y yo; las cosas no podrían ser mejores. Aunque parezca difícil de creer, hace poco estábamos a punto de divorciarnos. Todas esas agotadoras sesiones de terapia en pareja... y entonces, una simple terapia de oxitocina. En unas pocas sesiones, fue como si tuviéramos otra vez citas de novios. Oh, grandiosa química. Justo en este momento, estamos en la tercera botella de “Connect” que proporciona altos niveles de serotonina y bajos niveles de corticoesteroides. Claro que se

(Continúa)

Recuadro 15.4 (*Continuación*)

puede tener una conversación íntima sin estas cosas, pero con ellas es mucho más sencillo. Después iremos a bailar, que no es una gracia natural en mí pero con un poco de “Steppinex”, me puedo poner eufórico y gozar de intensas sensaciones de placer. Finalmente, y antes de manejar de regreso a casa; me tomo un “AntiStep” e instantáneamente recupero la sobriedad.

Fuente:

Vlaho, J. (2005), “The quest for a smart pill. Will drugs make us smarter and happier?”, *Popular Science*, 31 de julio.

carga emocional y parecen ayudar a borrar los recuerdos asociados con emociones negativas (Grillon y otros, 2004; Bryant, 2007). El modafinil (Provigil®, Nuvigil®) es un estimulante para la narcolepsia o somnolencia excesiva, pero es usado por aquellos que desean estar alerta y descansados después de cinco horas de sueño, como si hubieran dormido ocho horas. Es una droga eugeroica o estimulante que produce un estado fisiológico y psicológico específico de alerta y predisposición de larga duración (Becker y otros, 2004; Ramaekers, 2006). El metilfenidato (Ritalin®), prescrito para el trastorno del déficit de atención e hiperactividad, es tomado por adultos normales a quienes les gusta trabajar en múltiples ocupaciones, ya que mejora la concentración y la habilidad de planificación, específicamente la memoria de trabajo espacial y la habilidad de recordar lugares y direcciones (Diller, 1996; Farah y otros, 2004). Parecería ideal para personas que deben viajar de improvisado y arquitectos con dificultades para hacer planos. También hay estudios en los que el uso del donepezil mejoró la capacidad del lenguaje y la expresión en pacientes con síndrome de Down (Heller y otros, 2003). Otra posibilidad es la de buscar drogas inteligentes para usos específicos como el anisomycin, que es un antibiótico producido por un hongo y un inhibidor de la síntesis de proteínas que puede borrar la memoria de corto plazo (Nader, Schafe y Le Doux, 2000; Wang y otros, 2005).

No es que los neurocientíficos busquen drogas para ser usadas en neurología cosmética, sino que estos descubrimientos han sido realmente por serendipia. Sin embargo, en vista de los recientes y vertiginosos avances científicos y tecnológicos y los diversos usos encontrados fortuitamente para nuevos fármacos dirigidos contra padecimientos reales, significa que ya es tiempo de que los neurocientíficos sopesen las profundas implicaciones éticas de estos acontecimientos. Si los fármacos pueden mejorar el aprendizaje, hacer los recuerdos dolorosos menos notables y agudizar la atención, entonces: ¿pueden ser recetados por los médicos?; ¿deben ser recetados por los médicos?; ¿deben los pacientes tomarlos? ¿Podría una aerolínea distinguirse de sus competidores informando que su tripulación toma donepezil (Aricept®) para mejorar sus capacidades, cuando normalmente es un medicamento utilizado en el

tratamiento del Alzheimer? El doctor Chatterjee enfoca este dilema de la siguiente forma: “La distinción entre la terapia y la potenciación puede ser vaga, particularmente cuando la noción de *enfermedad* pierde sus límites definidos. Si uno de los propósitos de la medicina es el de mejorar la calidad de vida de los individuos que se consideran enfermos, entonces: ¿podría aplicarse el conocimiento médico a aquellos que se consideran sanos, llevando a los pacientes de un funcionamiento normal a un funcionamiento potenciado o mejorado? (Chatterjee, 2004; Begley, 2004).

2. *Neuroética*

Estos conceptos han generado la llamada “neuroética”, un área entre las neurociencias y la bioética que se fundamenta en siglos de discusión sobre los aspectos éticos asociados con la mente y el comportamiento. En términos generales, a la neuroética le conciernen las implicaciones éticas, legales y de política social de las neurociencias, incluyendo los aspectos de investigación. El incremento exponencial en la investigación sobre disciplinas relacionadas, la comercialización de las neurociencias cognitivas, los ímpetus por la aplicación y capacitación éticas, y la atención dirigida hacia el mejor entendimiento de las ciencias por el público en general, iluminan la importancia del papel que juega la neuroética en las neurociencias (Cheshire, 2006).

Dentro de los principales temas que aborda la neuroética, hay tres que son los que han generado una particular atención en la literatura formal, así como en la prensa popular: 1) la tecnología de imágenes del cerebro para detección de mentiras; 2) el incremento cognitivo, y, 3) la mercadotecnia dirigida al consumidor sobre los servicios y productos para el cerebro. Si la sociedad está preocupada por saber cuáles testimonios son ciertos y cuáles no, también debería estar preocupada sobre la autenticidad del comportamiento. Ningún otro tema vinculado a las neurociencias enfrenta la cuestión de la autenticidad más que el incremento cognitivo. Si la capacidad de memoria y atención es mejorada por medio del uso de drogas inteligentes de cualquier tipo, el objetivo es fundamentalmente el control farmacológico sobre las funciones cognitivas. Tal intervención podría tener un impacto medible y redituable, al permitir a un individuo interactuar más efectivamente en su ambiente de manera que sus metas podrían o no ser alcanzadas por medio del trabajo arduo, buenos hábitos de trabajo y la total dedicación de la mente humana sobre un problema en particular. Incluso con la utilización de mecanismos neurales implantables, en un futuro a mediano plazo, se elevan aún más las consideraciones éticas. La discusión sobre estos temas está apenas iniciándose (Illes y Bird, 2006; Blank, 2007; Stanley, 2007; Turhan y otros, 2007).

CUARTA PARTE

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Este libro ha sido escrito con la convicción de que es imprescindible poseer una noción básica de la complejidad y naturaleza de los sistemas de TIC, para comprender el desarrollo de las actuales sociedades de la información y del conocimiento. Los aspectos elementales de la ingeniería y los conceptos tecnológicos de las TIC se han hecho indispensables para efectuar investigaciones exitosas y formular políticas con un enfoque socioeconómico. Esto es especialmente importante para los países en desarrollo, ya que en estas naciones el progreso técnico es en su mayoría exógeno. Un entendimiento más profundo de los fenómenos, incluyendo las trayectorias tecnológicas y las soluciones tecnológicas interdependientes más avanzadas, se ha convertido en un requisito para neutralizar la incertidumbre.

En las primeras tres partes del libro se han planteado tres mensajes centrales. En la primera parte se destaca que los sistemas de TIC desempeñan cuatro funciones que tienen efectos distintos. Las TIC que se aplican para la transmisión de la información son diferentes a aquellas con las que se procesan, interoperan y almacenan datos. Sin embargo, cada una de estas operaciones es necesaria para ejecutar las otras como, por ejemplo, en el proceso de creación de conocimiento. En la segunda parte del libro se demuestra que las tecnologías de la información y de las comunicaciones, en el sentido literal del concepto, han existido desde mucho antes del paradigma digital, ya que se pueden identificar trayectorias de innovación a través de los siglos y sería muy sorprendente que estos patrones establecidos de evolución de repente se detuvieran. En la tercera parte se expone cómo la idea de representar información en dígitos binarios para su transmisión, procesamiento, almacenamiento e interoperación conduce a innovaciones de sistemas numerosas e interdependientes. La convergencia de estos diversos sistemas tecnológicos en el *bit* y su combinación constituyen lo que hoy se

conoce como TIC. Una revisión de las actuales tecnologías más avanzadas demuestra que es simplista reducir el paradigma digital a una invención específica como el microprocesador o internet. El sistema digital debe ser considerado en su totalidad para poder evaluar las implicaciones que tiene en la organización socioeconómica de las sociedades de la información y del conocimiento.

16. CONCLUSIONES PRINCIPALES¹

Del aporte que se ha hecho en este libro se derivan cinco conclusiones principales:

1. La evolución de las TIC continuará.
2. De la información se pasa al conocimiento.
3. A medida que se hace omnipresente la tecnología molecular, las TIC son un requisito básico.
4. Se producirán cambios de paradigma en las avenidas de innovación de las TIC.
5. La convergencia de las TIC convierte a la red en la computadora.

a. La evolución de las TIC continuará

Las tecnologías para capturar, interoperar, almacenar, transmitir y procesar información son tan antiguas como la humanidad, y se ha demostrado a nivel empírico un ritmo de crecimiento en su desempeño. Teóricamente no existe un impedimento para que esta tendencia continúe durante un tiempo importante. Si se supone que los procesos de información no digital no se ven afectados por la evolución de las TIC, se puede asegurar que en 2006 se ha instalado la capacidad para difundir tres veces más información a través de redes que en 1980 y casi dos veces más que en 1990; hubo 25 veces más capacidad de comunicación en 2006 que en 1980 y 19 veces más que en 1990; se podía almacenar 32.000 veces más información en 2006 que en 1980 y 5.300 más que en 1990 y había las posibilidades para procesar 477.000 veces más información en 2006 que en 1980 y 9.500 que en 1990 (*véase* cuadro en la segunda parte del libro). En otras palabras, en la actualidad cada año se capta, almacena y procesa más información que en los últimos cientos de años. Esto lleva al hecho de que la cantidad de información que puede ser procesada por la inteligencia artificial está igualando al caudal de información que puede ser procesado por la inteligencia humana, teniendo en cuenta la capacidad limitada del cerebro. Por supuesto que esto no deriva en diferencias cualitativas entre la inteligencia artificial y biológica, pero convierte las TIC en los sistemas de procesamiento de información cada vez más importantes.

El índice sostenido de innovación hace que el futuro sea cada vez más incierto. Se ha visto avances en la elaboración de interfaces cerebrales que conectan los pensamientos humanos directamente con máquinas informáticas mediante una suerte de

¹ Este capítulo ha sido escrito por Martin Hilbert, de la Cepal.

“telepatía” (del griego, sentimiento a distancia); la comunicación por teletransporte cuántico; la recreación del procesamiento biológico por medio de la biotecnología y la nanotecnología, y los enormes depósitos de información sobre virtualmente todos los aspectos de la realidad, representan una nueva generación de TIC y un modo de pensar evolutivo a la hora de diseñar las correspondientes políticas públicas. En la formulación de políticas y en el análisis relacionados a las TIC se debe considerar la naturaleza dinámica del progreso técnico, que probablemente se acelerará.

b. De la información se pasa al conocimiento

Distinguir entre las cuatro operaciones informáticas básicas es importante para no confundir los diferentes efectos de las TIC. Uno de ellos es la mayor circulación de información, mientras que otro –aunque no está relacionado automáticamente– tiene que ver con la creación de conocimiento. Por supuesto que un mayor intercambio de información podría conducir a una creación más rápida de conocimiento, ya que sin la circulación de información no se crearía conocimiento alguno. Sin embargo, esta causalidad no es inamovible. En el capítulo sobre información, conocimiento y TIC se ha definido la información como datos que se pueden suministrar con significado por medio del contexto de una red relacional. El conocimiento se puede entender como un algoritmo compacto y dinámico que permite hacer predicciones sobre la conducta de cualquier fuente de información. Se presentó el ejemplo del ajuste de curvas como metáfora. Desde una perspectiva empírica hacia la creación de conocimiento, sería necesario analizar grandes cantidades de información para extraer procedimientos compactos que permitan hacer predicciones sobre la realidad. Como las computadoras son una herramienta muy eficaz para este fin, las ciencias en su conjunto se benefician de esta capacidad.

En el campo de la biología se ha logrado dilucidar el genoma humano antes de lo esperado gracias al progreso alcanzado en la capacidad de procesamiento de las TIC. Los físicos esperan avanzar en su búsqueda de una teoría unificada, mediante la creación de un acelerador y colisionador de partículas de 27 kilómetros de largo que cuesta 6.000 millones de dólares (el gran colisionador de hadrones de la Organización Europea para la Investigación Nuclear, CERN). En la astrofísica siempre se están construyendo sensores más potentes para estudiar el espacio infinito. En la medicina se espera poder vigilar el estado de salud de las personas por medio de biosensores, y en la administración de empresas ya no se puede trabajar sin utilizar grandes sistemas de datos llamados CRM, *customer-relationship-manager* (administrador de relaciones con el cliente), y ERP, *enterprise-resource-planning* (planificación de los recursos de la empresa). Las cátedras de economía y sociología en las universidades ya parecen ser cursos para aprender a operar un *software* de estadísticas con el fin de explorar extensas bases de datos, y para modelar la realidad de acuerdo con lo que identifique el programa. En síntesis, las TIC se han convertido en el motor que impulsa la creación de conocimiento en todas las ciencias.

Si bien esto es innegable, la percepción general es que el período pasado del paradigma digital se ha caracterizado por un incremento explosivo en la transmisión y al-

macenamiento de información y en la difusión de soluciones tecnológicas afines. El rendimiento de las soluciones tecnológicas en el procesamiento del mayor caudal de información no ha satisfecho las promesas que se hicieron sobre la inteligencia artificial en los años ochenta (el llamado invierno de la IA). Parece ser que nuestra inteligencia biológica no es capaz de procesar toda la información que circula en internet de una manera efectiva, y las sociedades de la información se están viendo desbordadas. Los avances esporádicos que ayudan a catalogar toda esta información son ampliamente celebrados; el servicio al cliente individualizado de Google y Amazon son algoritmos compactos y dinámicos que hacen más fácil dar un significado a los datos. Asimismo, el conocimiento que se ha acumulado en Google sobre cómo llegar al portal de internet más idóneo y el conocimiento que representa el servicio de negocio-electrónico sobre las preferencias de lectura del cliente, son resultados esperanzadores del progreso embrionario que se ha alcanzado en el campo de la inteligencia artificial. El próximo período del paradigma digital estará más enfocado en el procesamiento de la abundante información existente y su conversión en conocimiento. Se espera que la perspectiva cognitiva en las soluciones tecnológicas para producir inteligencia sea el eje central del progreso técnico, en reemplazo de una mera infraestructura para transmitir y almacenar información.

c. A medida que se hace omnipresente la tecnología molecular, las TIC son un requisito básico

Según la teoría que se ha presentado sobre el recambio cada más rápido de los ciclos, el predominio del paradigma digital debería estar llegando a su fin, ya que ha sido el paradigma dominante durante más de tres décadas. El paradigma digital está siendo permeado por tecnologías con las que se manipulan moléculas, como la nanotecnología y la biotecnología, que se espera serán las tecnologías habilitadoras en la próxima onda larga socioeconómica de la humanidad. En términos generales, las ondas largas consecutivas se acumulan unas sobre otras; por ejemplo, el paradigma digital depende de la disponibilidad de corriente eléctrica. Esto convierte al paradigma digital en una condición *sine qua non* para el progreso socioeconómico, de la misma manera que los anteriores paradigmas de la termodinámica y el motor de combustión son la base de nuestra organización socioeconómica actual. El paradigma científico de la biotecnología quedó en el centro de la atención pública cuando se descifró el genoma humano, y las TIC fueron la clave para alcanzar ese logro. De la misma manera, las TIC son esenciales cuando se piensa en manipular materiales a nivel molecular, ya que sin ellas sería impensable la creación de nanomateriales.

d. Se producirán cambios de paradigma en las avenidas de innovación de las TIC

Al mismo tiempo que se espera que continúe la evolución general de las TIC, también se cree que habrá cambios de paradigma en casi todos los subsistemas tecnológicos. Varios de los paradigmas de los subsistemas de TIC están llegando a su límite, lo que

es una señal de próximas innovaciones de sistemas que serán acompañadas de cambios de paradigma tecnológico en sus avenidas de innovación. Las interfaces actuales no son efectivas y cada vez más deben acercarse a una simbiosis entre seres humanos y máquinas; las técnicas para producir *hardware* afrontan problemas de tamaño; está claro que el método de la fuerza bruta de diseño de *software* e inteligencia artificial no ha tenido los resultados esperados y que se deben aplicar esquemas cognitivos y neurológicos; y las telecomunicaciones se han reorganizado totalmente mediante la convergencia de redes. Las innovaciones de sistemas esperadas surgirán, como ha ocurrido a menudo, de la integración de dos o más tecnologías simbióticas con las que se intentará simplificar la estructura general del sistema tecnológico. La biotecnología y la nanotecnología seguramente tendrán un papel decisivo en los nuevos paradigmas tecnológicos de sistemas de TIC.

e. La convergencia de las TIC convierte a la red en la computadora

Es evidente que la convergencia de las TIC en el *bit*, es decir, el hecho de que todos los procesos tecnológicos de información y comunicaciones se hacen interoperables a nivel digital, conduce al surgimiento de la inteligencia de la red, una conclusión en la que se debe ahondar.

Stallings (2007) describe tres características de la convergencia de las TIC en la octava edición de su premiado libro sobre computación e ingeniería: no existe una diferencia fundamental entre dispositivos de computación y transmisión de datos; no existe una diferencia fundamental en la transmisión de diferentes formatos de información, como datos, voz y video; y la frontera entre los dispositivos de computación y la red se hace difusa (la red es la computadora). El hecho de que las cuatro operaciones informáticas se apoyan en el *bit* permite la convergencia armónica en una red mayor.² La infraestructura de la información y las comunicaciones está siendo homologada, debido a la efectividad de trabajar con la información en un formato binario.

Las repercusiones son importantes cuando se analiza la red desde un nivel superior. Si se tiene en cuenta la arquitectura de una máquina de Turing como la que se ha presentado anteriormente, una entidad de procesamiento de información requiere una unidad de computación para manipular símbolos; un almacenamiento temporal para respaldar la información; interfaces para capturar y difundir resultados y canales de comunicación para transferir información entre estas instancias. Una computadora ya constituye un pequeño sistema de TIC, que ahora se estaría reproduciendo en una red digital armónica. El almacenamiento puede estar en otra ubicación que la unidad de procesamiento, y los sensores podrían capturar la información desde un

² Tapscott (1996) presenta la misma idea con sus tres C. “Un resultado de la convergencia de tres sectores más tradicionales: las comunicaciones (telefonía, cable coaxial, satélite y dispositivos inalámbricos); la computación (computadoras, *software* y servicios); y contenido (publicaciones, entretenimiento, proveedores de información”.

lugar distante. Las redes digitales de banda ancha articulan el sistema, de la misma manera que un conector de memoria une a la unidad central de procesamiento con la memoria principal dentro de una computadora con arquitectura Von Neumann. Los estándares interoperables son la base de la combinación armónica de todo tipo de texto, fotos y videos en un solo esquema. En otras palabras, la convergencia de las TIC implica que la red misma se convierte en la computadora, una entidad de procesamiento de información al metanivel.

No obstante, es un diseño flexible de una computadora lo que refleja los cambios de la realidad. El siempre cambiante panorama de hiperenlaces garantiza la flexibilidad y universalidad de la red. Esto puede ocurrir de forma sincronizada en tiempo real, pero también de manera asincrónica en los vastos depósitos de información. La no rivalidad entre los datos digitales y las externalidades de la red aumenta el valor del contenido de la misma, y se convierte en “un espejo realista (o la principal representación) de las maneras en las que trabajamos, jugamos y socializamos” (Berners-Lee, 2005).

Para un número creciente de usuarios, lo que no está en la red no puede ser encontrado, y por tanto, no existe; esta tendencia se acentúa con las comunicaciones móviles y los servicios que revelan la situación y ubicación del usuario, y es menos probable que algún lugar o una tienda puede ser encontrado si no está en la red. El valor exponencial de la información en red, junto con la eficiencia, la efectividad y la transparencia de la información digital, conduce a una representación cada vez más importante de la realidad en el espacio virtual. En 2008, casi 100 millones de usuarios (más que los habitantes de 95% de los países del mundo) llevan una segunda vida en el ciberespacio (Second Life y Habbo Hotel), mientras las autoridades tienen que investigar crímenes y asesinatos reales basándose en los hechos que ocurren dentro de la red. La realidad esta cada vez más interrelacionada con la realidad virtual. La red misma representa un algoritmo gigantesco de conocimiento, un procedimiento eficaz y versátil que digitaliza la manera de hacer las cosas. Así se crea un marco institucional para la sociedad de la información, y se explica la importancia omnipresente de la tecnología.

Esta situación revela analogías con otros complejos sistemas autoorganizados, que son esquemas dinámicos de aprendizaje compuestos de módulos semiindependientes que se complementan para resolver problemas de forma colectiva. Los economistas conciben el desarrollo como una red evolutiva (Nelson y Winter, 1982) de naturaleza autoorganizativa (Krugman, 1996). Un sinnúmero de personas colabora dentro de un marco simple de reglas, como los derechos de propiedad y la posesión de dinero para producir ciertos bienes. La división del trabajo deriva en que un agente no sabe necesariamente dónde está otro agente o lo que está haciendo, pero todos cooperan para lograr metas comunes, como, por ejemplo, el suministro de alimentos o la producción de un automóvil. Otros sistemas que se autoorganizan son los biológicos, como el ecosistema de un bosque tropical y, por supuesto, la evolución de la red neuronal del cerebro (Bloom, 2000). Como sostiene el economista Paul Krugman (1996), “lo que tienen en común los embriones y los huracanes, los materiales magnéticos y las neuronas, es que son sistemas que se autoorganizan, es decir, sistemas que –inclu-

so cuando nacen de un estado homogéneo o casi casual– espontáneamente forman conjuntos de gran envergadura”. En la era de la conectividad digital omnipresente, esa reflexión ha sido la inspiración de muchos textos sobre la creación de un cerebro mundial que está “uniendo los miles de millones de mentes de la humanidad en un solo sistema” (Russell, 1999). Ya en 1851 Nathaniel Hawthorne formuló la pregunta: “¿El mundo de la materia se ha convertido en un gran nervio, vibrando a miles de kilómetros en una milésima de segundo? ¡Más bien, el globo terráqueo es una vasta cabeza, un cerebro, instinto con inteligencia!”. Las dos características comunes de esos complejos sistemas adaptativos son una red común de comunicación para coordinar la actividad colectiva y una masa crítica de partes que los constituyen.

Una de las preguntas más fascinantes que surgen de esta observación tiene que ver con la naturaleza eventualmente emergente de la red. Los fenómenos emergentes (*emergence*) han sido un tema de interés para la investigación científica desde hace mucho tiempo (Lewes, 1875), y se describen como “el surgimiento de estructuras, patrones y propiedades novedosos y coherentes durante el proceso de autoorganización en sistemas complejos” (Goldstein, 1999). Un ejemplo clásico es el cerebro; lo conforman alrededor de 100.000 millones de neuronas con una media de 1.000 conexiones por neurona, y cada una de ellas ejecuta la función de estimular o inhibir. Cada una de estas neuronas también posee su propia inteligencia y funciona acorde con su sensibilidad, experiencia y programación genética. No obstante, su cantidad y sus innumerables conexiones hacen que surja una inteligencia superior, que forma parte de un sistema que se denomina cerebro humano.

El concepto de niveles es clave para entender este fenómeno. Hofstadter (1979) usa el ejemplo de la “tía Hillary” para estudiar las diferencias entre niveles: señala la diferencia entre una colonia de hormigas y cada una de las hormigas que la constituyen. Desde el punto de vista de un oso hormiguero, la colonia entera actúa como un todo y puede denominarse “tía Hillary” (A[u]nt Hill[ary], un juego de palabras en inglés). Según la metáfora de Hofstadter, si bien las hormigas se comunican entre sí, la “tía Hillary” se comunica con el oso hormiguero a un nivel superior. Esto ocurre por medio de los patrones de información codificados en los senderos siempre cambiantes de la colonia de hormigas. Al contrario de las hormigas a nivel individual, la “tía Hillary” como un todo incluso puede mostrarse agradecida cuando el oso hormiguero devora su estructura, porque le permite a la colonia renovar partes de su estructura y deshacerse de partes innecesarias. “Cada una de las hormigas de la ‘tía Hillary’ es tonta... [pero] a pesar de la extrema simpleza de este esquema en una escala menor, puede dar origen a consecuencias muy complejas en una escala superior” (Hofstadter, 1979). Por supuesto que al mismo tiempo el oso hormiguero mismo es un complejo sistema adaptativo compuesto de innumerables células que funcionan sobre la base de una lógica bastante simple, pero colaboran en sintonía para permitir que el animal se comunique con su compañera, la “tía Hillary”.

En las últimas décadas se han realizado varias investigaciones sobre los sistemas emergentes. Si bien en la literatura se le atribuye un origen místico al surgimiento de formas superiores de inteligencia a partir de mecanismos básicos (Johnson, 2001), en otros sectores se llevan a cabo ejercicios computarizados para reconstruir y compren-

der paso por paso la naturaleza de ese fenómeno.³ Es evidente el vínculo que existe entre las TIC y los fenómenos emergentes; como se ha explicado, los ingenieros de *software* generalmente elaboran unidades independientes llamadas subrutinas o módulos y las aglutinan en programas más complejos, a la vez que cada una de ellas resuelve un subcómputo particular. Para constituir un programa bien compacto que aborde problemas complejos, se requiere la integración de varias subrutinas que conduzca a un diseño altamente modular con instrucciones en diferentes niveles jerárquicos; la aplicación de diferentes niveles es la lógica básica para la creación de inteligencia artificial.

Con esta meta, ingenieros e investigadores en el campo socioeconómico han creado simuladores de sistemas complejos: diversas simulaciones computarizadas de la economía demuestran cómo es posible que una masa crítica de agentes comunicadores se organice rápidamente de acuerdo con reglas específicas como los derechos de propiedad o incentivos básicos, para poder alcanzar metas más amplias (Baum, 2000). En este sentido, una economía digitalizada podría definirse como una entidad, ya que está compuesta de una red de operaciones informáticas que –por medio de una masa crítica de agentes que hacen su aporte y un sistema coherente de comunicación– está dedicada a lograr metas específicas. Los objetivos de los cómputos que se realizan en este sistema son congruentes con las metas de la empresa.

Parece ser que la convergencia de las TIC está creando un gran sistema de información que abarca a múltiples tipos de agentes de procesamiento y almacenamiento en una red armónica. Si se considera a la red de redes como un solo sistema informático, también se podría aseverar que las sociedades de la información y del conocimiento están comprendidas por esta red. Esta red incluye la inteligencia artificial y biológica; algunas partes son implementadas con algoritmos computarizados y otras son el resultado del conocimiento humano. En un nivel superior de abstracción, surge un algoritmo dinámico que deriva en la interrogante: ¿qué es lo que se está procesando en las sociedades de la información y del conocimiento? Serán necesarias investigaciones más profundas para comprender esta dinámica.

³ Como por ejemplo la aplicación del *software* StarLogo del Instituto Tecnológico de Massachusetts - MIT (Resnick, 1997). La dirección de StarLogo en internet es: <http://education.mit.edu/starlogo/>

BIBLIOGRAFÍA

- Aamodt, A. y E. Plaza (1994), "Case-based reasoning: foundational issues, methodological variations, and system approaches", *Artificial Intelligence Communications*, vol. 7, N° 1, Amsterdam, IOS Press.
- Aaronson, S. y G. Kuperberg (2006), "Complexity zoo" (en línea) http://qwiki.caltech.edu/wiki/Complexity_Zoo.
- Abdelzaher, T. y otros (2007), "Mobiscopes for human spaces", *IEEE Pervasive Computing*, vol. 6, N° 2, Washington, D.C., IEEE Computer Society.
- Abdelyamen, H. y otros (2004), *Recent Advances in Photonic Devices for Optical Computing*, Huntsville, NASA Marshall Space Flight Center (en línea) <http://science.nasa.gov/headlines/images/nanosecond/thepaper.pdf>
- Abe, S. (1999), "Progress in transmission systems", *OKI Technical Review*, vol. 65, N° 3, Tokio, Oki Electric Industry Co., marzo.
- Addington, M. y D. Schodek (2004), *Smart Materials and Technologies in Architecture*, Oxford, Architectural Press.
- Adleman, L. (1998), "Computing with DNA", *Scientific American*, Nueva York, Scientific American Inc., agosto.
- . (1994), "Molecular computation of solutions to combinatorial problems", *Science*, vol. 266, Washington, D.C., American Association for the Advancement of Science.
- Aguirre, C. y otros (2006), "Carbon nanotube sheets as electrodes in organic light-emitting diodes", *Applied Physics Letters*, vol. 88, N° 18, College Park, Maryland, American Institute of Physics, mayo.
- Alam, S., D. Troxel y C. Thompson (2003), "Layout-specific circuit evaluation in 3-D integrated circuits", *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 35, N° 2-3, Nueva York, Springer.
- Albert, R., H. Jeong y A-L. Barabási (2000), "Error and attack tolerance of complex networks", *Nature*, vol. 406, Houndmills, Nature Publishing Group.
- Al-Chalabi, Ammar, Martin Turner y Shane Delamont (2006), *The Brain: a Beginner's Guide*, Oxford, Oneworld Publications.
- Alexander, Arthur y J.R. Nelson (1972), *Measuring Technological Change: Aircraft Turbine Engines*, Santa Monica, RAND (en línea) <http://www.rand.org/pubs/reports/2005/R1017.pdf>

- Alonso, C. (2003), "Apunte reunificado de grabación de sonido", julio (en línea) http://z.tardis.cl/sd/ap_grab_1y2.fh11.pdf
- Altair Microcomputers (s/f), "The virtual altair museum" (en línea) <http://www.virtualaltair.com/virtualaltair.com/virtualaltair.asp>.
- Alzheimer's Association (2006), "About Alzheimer's statistics", Chicago (en línea) <http://www.alz.org>
- Amadio, J. y C. Walsh (2006), "Brain evolution and uniqueness in the human genome", *Cell*, vol. 126, N° 6.
- American Statistical Association (s/f), *Journal of Statistics for the Physical, Chemical and Engineering Sciences*, Alexandria, Virginia (en línea) <http://www.amstat.org/publications/TECH>.
- Amos, M. (2003), *Theoretical and Experimental DNA Computation*, Nueva York, Springer-Verlag.
- Andersen, D. y otros (2004), "Sensor foresight-Technology and market", *Technovation*, vol. 24, N° 4, Amsterdam, Elsevier.
- Andersen, Richard y otros (2004), "Cognitive neural prosthetics", *Trends in Cognitive Science*, vol. 8, N° 11, Londres, Elsevier Ltd., noviembre.
- Andrikopoulos, G.K. y otros (2004), "Genetic factors in exceptional longevity", *JAMA*, vol. 291, Chicago, Illinois, American Medical Association.
- Anglin, J. y W. Ketterle (2002), "Bose-Einstein condensation of atomic gases", *Nature*, vol. 416, Houndmills, Nature Publishing Group.
- Annals of Improbable Research (2006), "The Ig Nobel Prizes. Research that makes people laugh and then think", Cambridge, Massachusetts (en línea) <http://www.improb.com/ig>.
- Aray, Y. y otros (2003), "Electrostatics for exploring the nature of water adsorption on the Laponite sheet's surface", *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 107, Washington, D.C., American Chemical Association.
- Arbib, M.A. (2002), *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*, Cambridge, Massachusetts, MIT Press.
- Arthur, Brian (1989), "Competing technologies, increasing returns and lock-in by historical events", *Economic Journal*, vol. 99, N° 394, Oxford, Blackwell Publishing.
- Audus, K.L. y otros (1992), "Brain uptake of drugs: the influence of chemical and biological factors", *Advances in Drug Research*, vol. 23, Londres, Academic Press.
- Ausiello, G. y otros (1999), *Complexity and Approximation: Combinatorial Optimization Problems and their Approximability Properties*, Berlin, Springer-Verlag (en línea) <http://www.nada.kth.se/~viggo/approxbook/>.
- Avouris, P. y P. Collins (2000), "Nanotubes for electronics", *Scientific American*, vol. 283, N° 6, Nueva York, Scientific American Inc.
- Awschalom, D. y M. Flatti (2007), "Challenges for semiconductor spintronics", *Nature Physics*, vol. 3, N° 153, Houndmills, Nature Publishing Group.
- Backus, J. (1978), "Can programming be liberated from the von Neumann style?", *Communications of the ACM*, vol. 21, N° 8, Nueva York, Association for Computing Machinery.

- Báez, O. (2005), "Guerra santa contra la teoría de la evolución", [voltairenet.org](http://www.voltairenet.org/article131668.html) (en línea) <http://www.voltairenet.org/article131668.html>
- Bailenson, J.N. y otros (2008), "The use of immersive virtual reality in the learning sciences: digital transformations of teachers, students, and social context", *The Journal of the Learning Sciences*, vol. 17, N° 8, Londres, Routledge.
- Bains, S. (2007), "Mixed feelings", *Wired News*, marzo (en línea) <http://www.wired.com/wired/archive/15.04/esp.html>
- Baker, M. y otros (1992), "Non-volatile memory for fast, reliable file system" (en línea) <http://www.eecs.harvard.edu/~margo/papers/asplos92/paper.pdf>
- Bar-Cohen, Y. (2000), "Electroactive polymers as artificial muscles-capabilities, potentials and challenges", *Handbook on Biomimetics*, Yoshihito Osada (ed.), Pasadena, California, NTS Inc.
- Barone, P. y otros (2005), "Near-infrared optical sensors based on single-walled carbon nanotubes", *Nature Materials*, vol. 4, Houndmills, Nature Publishing Group.
- Barr, M. (2001), *Memory Types*, Embedded Systems Programming, mayo.
- Baum, Eric (2004), *What is Thought?*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press.
- . (2000), "Manifiesto for an evolutionary economics of intelligence", NEC Research Institute, www.whatisthought.com/manif5.ps
- Baur, J. y A. Hagenlocher (2007), "The FHTE Web history of telecommunications" (en línea) <http://www2.hs-esslingen.de/telehistory/1975-.html>
- Beauchamp, G. (1985), "The chemosensory recognition of genetic individuality", *Scientific American*, vol. 253, N° 1, Nueva York, Scientific American Inc.
- Beck, J., M. Stern y E. Haugsjaa (2004), "Applications of AI in education", *The ACM Student Magazine*, Nueva York, Association for Computing Machinery (en línea) <http://www1.acm.org/crossroads/xrds3-1/aied.html>.
- Becker, P.M. y otros (2004), "Effect of modafinil on fatigue, mood, and health-related quality of life in patients with narcolepsy", *Psychopharmacology*, vol. 171, N° 2, Berlín, Springer.
- Begley, S. (2004), "Memory drugs create new ethical minefield", *The Wall Street Journal*, Nueva York, 1 de octubre.
- Bekenstein, Jacob (2003), "Information in the holographic universe", *Scientific American*, Nueva York, Scientific American Inc., julio.
- Belk, Jeffrey (2007), "CDG Webcast. CDMA2000: insight into the future of 3G devices and services", Qualcomm (en línea) http://www.cdg.org/news/events/webcast/070228_webcast/Qualcomm.pdf
- Bell, Daniel (1973), *The Coming of Post-industrial Society a Venture of Social Forecasting*, Nueva York, Basic Books.
- Benenson, Yaakov y otros (2001), "Programmable and autonomous computing machine made of biomolecules", *Nature*, vol. 414, Houndmills, Nature Publishing Group, noviembre.
- Bennett, Charles y Rolf Landauer (1985), "The fundamental physical limits of computation", *Scientific American*, vol. 253, N° 2, Nueva York, Scientific American, Inc. (en línea) <http://www.aeiveos.com/~bradbury/Authors/Computing/Bennett-CH/TFPLoC.html>

- Berendt, B., O. Günther y S. Spiekermann (2005), "Privacy in e-commerce: stated preferences vs actual behavior", *Communications of the ACM*, vol. 48, N° 4, Nueva York, Association for Computing Machinery, abril.
- Berman, G. y otros (1998), *Introduction to Quantum Computers*, River Edge, New Jersey, World Scientific Publishing Co.
- Berners-Lee, Tim (2005), "The World Wide Web: a very short personal history" (en línea) <http://www.w3.org/People/Berners-Lee/ShortHistory>
- Bethune, D. y otros (1993), "Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls", *Nature*, vol. 363, Houndmills, Nature Publishing Group.
- Bez, R. y otros (2003), "Introduction to flash memory", *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, N° 4, Washington, D.C., Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Bhushan, B. (2000), *Mechanics and Reliability of Flexible Magnetic Media*, Nueva York, Springer.
- Bickerton, Derek (1995), *Language and Human Behavior*, Londres, UCL Press Limited.
- Binet, A. y T. Simon (1916), *The Development of Intelligence in Children*, Baltimore, Williams & Wilkins.
- Binning, G., C. Quate y Ch. Gerber (1986), "Atomic force microscope", *Physical Review Letters*, vol. 56, N° 9, College Park, American Physical Society.
- Binning, G. y otros (1982), "Surface studies by scanning tunneling microscopy", *Physical Review Letters*, vol. 49, N° 1, College Park, American Physical Society.
- Birbaumer Niels y otros (2000), "The thought translation device (TTD) for completely paralyzed patients", *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, vol. 8, N° 2, Piscataway, New Jersey, IEEE Engineering in Medicine and Biological Society (en línea) <http://www.ocf.berkeley.edu/~anandk/neuro/thought%20translation%20device%20for%20paralyzed%20patients.pdf>.
- _____. (1999), "A spelling device for the paralysed", *Nature*, Houndmills, Nature Publishing Group.
- Blank, R.H. (2007), "Policy implications of the new neuroscience", *Cambridge Quarterly of Healthcare Ethics*, vol. 16, N° 2, Cambridge, Massachusetts, Cambridge University Press.
- Blatt, Robert (1995), "Optical storage standards", julio (en línea) http://www.eid-inc.com/white_paper/199507s.pdf
- Bliss, T.V.P., G.L. Collingridge y S. Laroche (2006), "ZAP and ZIP, a story to forget", *Science*, vol. 313, N° 5790, Washington, D.C., American Association for the Advancement of Science.
- Bloom, Howard (2000), *Global Brain: The Evolution of Mass Mind from the Big Bang to the 21st Century*, Nueva York, John Wiley & Sons Inc.
- Blumenthal, D., J. Bowers y C. Partridge (eds.) (2005), "Mapping a future for optical networking and communications", *NSF Workshop Report*, Global Environment for Network Innovations (GENI), julio.
- Boole, George (1854), *An Investigation of the Laws of Thought on Which are Founded the Mathematical Theories of Logic and Probabilities*, Londres, Macmillan.
- Boriello, G. y otros (2007), "Building a sensor-rich world", *IEEE Pervasive Computing*, vol. 6, N° 2, Washington, D.C., IEEE Computer Society.

- Bostrom, N. (2005), "The future of humankind scenarios from heaven to hell, with stops along the way", *Scientific American Digital*, Nueva York, Scientific American Inc., julio.
- Bouwmeester, D., A. Ekert y A. Zeilinger (eds.) (2000), *The Physics of Quantum Information*, Berlin, Springer-Verlag.
- Bowers II, M., J. McBride y S. Rosenthal (2005), "White-light emission from magic-sized cadmium selenide nanocrystals", *Journal of the American Chemical Society*, vol. 127, N° 44, Washington, D.C., American Chemical Society.
- Brady, A. (2006), "Latest results in search for large values" (en línea) <http://www.cse.unr.edu/~al/BusyBeaver.html>.
- Bray, M. y M. Mahony (2006), *The Missing Link: Broadband Access Networks*, Essex, Reino Unido, Universidad de Essex, enero.
- Bremermann, Hans (1965), "Quantum noise and information", *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, vol. 4, Berkeley, California, University of California Press.
- . (1962), "Optimization through evolution and recombination", *Self-Organizing Systems*, Washington, D.C., Spartan Books (en línea) <http://www.aeiveos.com/~bradbury/Authors/Computing/Bremermann-HJ/OTeAR.html>
- Briegel, H. y otros (1999), "Physical implementations for quantum communication in quantum networks", *Quantum Computing and Quantum Communications*, vol. 1509, Londres, Springer-Verlag.
- Britch, J. (2002), "El rol de la ciencia del ambiente en la era de los biomateriales", *Ambiente ecológico*, N° 83, Multimedia Ambiente Ecológico, marzo-abril.
- Broadbent, D. (1958), *Perception and Communication*, Londres, Pergamon Press.
- Broersma, M. (2002), "Smart clothing expected to take off", CNET News.com, 5 de septiembre (en línea) <http://mews.com.com/2100-1040-956696.html>
- Brooks, Rodney (2003), "Toward a brain-internet link", *Technology Review*, Cambridge, Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology, noviembre (en línea) <http://www.technologyreview.com/articles/03/11/brooks1103.0.asp> .
- Brooks, Andrew, Deborah Cory-Slechta y Howard Federoff (2000), "Gene-experience interaction alters the cholinergic septohippocampal pathway of mice", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (en línea) <http://www.pnas.org/cgi/content/abstract/97/24/13378>
- Bryant, R.A. (2007), "Early intervention for post-traumatic stress disorder", *Early Intervention in Psychiatry*, vol. 1, N° 1, Oxford, Blackwell Publishing, febrero.
- Bulusu, N. y S. Jha (2005), *Wireless Sensor Network A Systems Perspective*, Londres, Artech House.
- Bullis, K. (2005), "Brighter nanotubes", *Technology Review*, Cambridge, Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology http://www.technologyreview.com/read_article.aspx?id=15925&ch=nanotech
- Burdea, G. y P. Coiffet (2003), *Virtual Reality Technology*, Nueva York, Wiley-IEEE Press.
- Burdick, K. y otros (2006), "Genetic variation in DTNBP1 influences general cognitive ability", *Human Molecular Genetics*, vol. 15, N° 10, Nueva York, Oxford University Press

- Bush, Vannevar (1945), "As we may think", *The Atlantic Monthly*, vol. 176, N° 1, Washington, D.C., The Atlantic Monthly Group (en línea) <http://www.theatlantic.com/doc/194507/bush>
- Buster, D. (2005), *Towards IP for space based communications systems; a Cisco Systems assessment of a single board router*, IEEE MILCOM 2005, Atlantic City, octubre.
- Cable News Network (1998), "Europe's first ADSL service launches" (en línea) <http://www.cnn.com/TECH/computing/9812/10/euradsl.idg/>
- Cabrera, R. (2004), "Con la mente en la cabeza. El cerebro en manos de los científicos", *EXACTA mente*, N° 30, Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, junio.
- Cairncross, Francis (1997), *The Death of Distance: How the Communications Revolution will Change our Lives*, Cambridge, Massachusetts, Harvard Business School Press.
- Cairó, O. (2007), *El hombre artificial*, Londres, Pearson.
- Cairó, O., A. Aldeco y M. Algorri (2001), "Virtual museum's assistant", *Intelligent Agent Technology: Research and Development*, N. Zhong y otros (eds.), Terrasa, Japón, World Scientific.
- Calvin, W.H. (1997), *How Brains Think: Evolving Intelligence, Then and Now*, Nueva York, Basic Books.
- _____. (1996), *The Cerebral Code: Thinking a Thought in the Mosaics of the Mind*, Cambridge, Massachusetts, MIT Press.
- Canny, J. (2006), "The future of human computer interaction", *ACM Queue*, vol. 4, N° 6, Nueva York, Association for Computer Machinery.
- Cappelletti, P. y otros (eds.) (1999), *Flash Memories*, Norwell, Kluwer Academic Publishers.
- Carbonell, J. (1970), "AI in CAI: an artificial intelligence approach to computer assisted instruction", *IEEE Transaction on Man Machine System*, vol. 11, N° 4, Washington, D.C., Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Card, S., T. Moran y A. Newell (1983), *The Psychology of Human-Computer Interaction*, Hillsdale, New Jersey, Erlbaum.
- Cardamation Company (s/f), "Card equipment supplies" (en línea) <http://www.cardamation.com/supplies.html>
- Cardamone, D., C. Stafford y S. Mazunder (2005), "The quantum interference effect transistor" (en línea) <http://arxiv.org/abs/cond-mat?papernum=0503540>
- Carmena, José y otros (2003), "Learning to control a brain-machine interface for reaching and grasping by primates", *PLoS Biology*, vol. 1, N° 2, San Francisco, Public Library of Science (en línea) <http://biology.plosjournals.org/perlserv/?request=get-document&doi=10.1371/journal.pbio.0000042>
- Castells, M. (1996), "The Rise of the Network Society", *The Information Age: Economy, Society and Culture*, Volume I, Blackwell Publishers
- Castells, M. (2001), *The Internet Galaxy: Reflections on the Internet, Business and Society*, Nueva York, Oxford University Press
- _____. (2000), *The Rise of the Network Society. The Information Age: Economy, Society and Culture*, vol. 1, Oxford, Reino Unido, Blackwell Publishers Ltd.

- Cavalli-Sforza, L. (2000), "The proper study of mankind", *The Economist* (en línea) http://www.economist.com/background/displayStory.cfm?Story_id=2854
- Cheshire Jr., William P. (2006), "Drugs for enhancing cognition and their ethical implications: a hot new cup of tea", *Expert Review of Neurotherapeutics*, vol. 6, N° 3, Londres, Expert Reviews.
- Choi, C. (2004), "Philips unveils ultra-thin flexible display", *Forbes.com*, 26 de enero (en línea) http://www.forbes.com/2004/01/26/0126flexiblepinnacor_ii_print.html
- Christensen, Clayton (1999), *El dilema de los innovadores*, Buenos Aires, Ediciones Granica.
- Christensen J. y otros (2006), "Too much information", *ACM Queue*, vol. 4, N° 6, Nueva York, Association for Computing Machinery.
- CIA (Central Intelligence Agency) (2007), "The world fact book" (en línea) <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/> http://en.wikipedia.org/wiki/The_World_Factbook
- Cimoli, Mario y Giovanni Dosi (1995), "Technological paradigms, patterns of learning and development: an introductory roadmap", *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 5, N° 3, Nueva York, Springer.
- Clark, D. y otros (2006), *Conceptual Design Project Execution Plan*, Global Environment for Network Innovations (GENI) (en línea) <http://www.geni.net/GDD/GDD-06-07.pdf>
- Clarke, Arthur (1962), *Profiles of the Future: An Inquiry into the Limits of the Possible*, Nueva York, Harper & Row.
- . (1945), "Extra terrestrial relays", *Wireless World*, octubre.
- CMI (Clay Mathematics Institute) (2006), "Millennium problems" (en línea) <http://www.clay-math.org/millennium/>.
- CMU (Carnegie Mellon University) (2000), "The CAPTCHA Project", School of Computer Science at Carnegie Mellon University (en línea) <http://www.captcha.net/>.
- CNET.com (2006), "A brief history of hard drives", *news.com* (en línea) http://news.com.com/2300-1010_3-6031405-1.html?tag=ne.gall.pg.
- CNST (Committee on New Sensor Technologies) (1995), "Expanding the vision of sensor materials", Washington, D.C., National Academy Press.
- CNUMAD (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo) (1992), "Convenio sobre la diversidad biológica" (en línea) <http://www.biodiv.org/convention/convention.shtml>
- Coates, J., J. Mahaffie y A. Hines (1996), *2025: Scenarios of U.S. and Global Society Reshaped by Science and Technology*, Greensboro, North Carolina, Oakhill Press.
- Coccia, Mario (2005), "Technometrics: origins, historical evolution and new directions", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 72, Amsterdam, Elsevier.
- Coffman, K.G. y A.M. Odlyzko (2000), *Internet Growth: Is there a "Moore's Law" for data traffic?*, AT&T Research labs, julio.
- Coisne, S. (2006), "L'aveugle qui voit", *Science & Vie Junior*, París, Excelsior Publications, abril.
- Collier, P. y otros (1999), "Electronically configurable molecular-based logic gates", *Science*, vol. 285, N° 5426, Washington, D.C., American Association for the Advancement of Science.

- Collins, F. y otros (2003), "A vision for the future genomic research", *Nature*, vol. 422, Houndmills, Nature Publishing Group.
- Comisión Europea (2006), *Interactive Content and Convergence: Implications for the Information Society. Final Report*, Londres, Screen Digest Ltd., octubre.
- ComputerHope.com (2007), "Computer history, 1990-2000" (en línea) <http://www.computerhope.com/history/19902000.htm>
- Computer Industry Almanac (2006), "PCs in-use surpassed 900M in 2005 USA accounts for over PCs in-use", (en línea) <http://www.c-i-a.com/pr0605.htm>
- Cooper, Martin (2001), "The myth, the law, and the spectrum", *IEEE SPECTRUM*, vol. 38, N° 1, Washington, D.C., Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), enero.
- Cordeiro, C. y otros (2005), *IEEE 802.22: The First Worldwide Wireless Standard based on Cognitive Radios*, IEEE DySPAN, Washington, D.C., Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), noviembre.
- CORDIAL (s/f), "Human-machine spoken dialogue", IRISA/INRIA Research Project (en línea) <http://www.inria.fr/recherche/equipes/cordial.en.html>
- Costa de Sousa, R. y Antonio Riul Jr. (2002), "Using MLP networks to classify red wines and water readings of an electronic tongue", *Proceedings of the VII Brazilian Symposium on Neural Networks*, Washington, D.C., IEEE Computer Society.
- Cox, J. (2008), "CES makes wireless LANs hot again", *NetworkWorld Executive Guide*.
- Cózar, J. (2003), "Nanotecnologías: promesas dudosas y control social", *CTS+I: Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología, Sociedad e Innovación*, N° 6, Madrid, Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
- Cragg, G.M, D.J. Newman y K.M. Snader (1997), "Natural products in drug discovery and development", *Journal of Natural Products*, vol. 60, N° 1, Washington, D.C., American Chemical Society.
- Creative Computing Magazine* (1981), "Historical notes about the cost of hard drive storage space", diciembre (en línea) <http://www.littletechshoppe.com/ns1625/winchest.html>.
- Crick, F. y C. Koch (1998), "Consciousness and neuroscience", *Cerebral Cortex*, vol. 8, N° 2, Nueva York, Oxford University Press.
- Cuevas, A. y otros (2006), "The IMS service platform: a solution for next-generation network operators to be more than bit pipes", *Communications Magazine*, vol. 44, N° 8, Washington, D.C., Washington, D.C., Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), agosto.
- Cukier, K. (2005), "Who will control the internet?", *Foreign Affairs*, Nueva York, Council on Foreign Relations, diciembre.
- Culler, D. y H. Mulder (2004), "Smart sensors to network the world", *Scientific American*, vol. 290, N° 6, Nueva York, Scientific American Inc. (en línea) <http://www.intel.com/research/exploratory/smartnetworks.htm>
- Culler, D. y G. Tolle (2007), "Embedded web services: making sense out of diverse sensors", *Sensors*, mayo (en línea) <http://www.sensormag.com/sensors/article/articleDetail.jsp?id=430624>
- Cumbre Mundial sobre la Sociedad de la Información (2006), *Agenda de Túnez para la Sociedad de la Información* (en línea) <http://www.itu.int/wsis/docs2/tunis/off/6rev1-es.html>

- _____. (2004), *Declaración de Principios* (en línea) <http://www.itu.int/wsis/docs/geneva/official/dop-es.html>
- Charniak, E. y D. McDermott (1985), *Introduction to Artificial Intelligence*, Reading, Massachusetts, Addison-Wesley Publishing Company.
- Chatterjee, A. (2004), “Cosmetic neurology. The controversy over enhancing movement, mentation and mood”, *Neurology*, vol. 63, Saint Paul, American Academy of Neurology.
- Cherry, S. (2004), “Edholm’s law of bandwidth”, *IEEE Spectrum online*, julio (en línea) <http://www.spectrum.ieee.org/jul04/3922>
- Chinoy, A. (2002), “Immersed in reality”, *Illumin. A Review of Engineering in Everyday Life*, vol. 5, N° 3, Los Ángeles, University of Southern California (en línea) <http://illumin.usc.edu/article.print.php?articleID=110>
- Chorost, M. (2005), *Rebuilt: How Becoming Part Computer Made Me More Human*, Nueva York, Houghton Mifflin Company.
- Church, Alonzo (1936), “An unsolvable problem of elementary number theory”, *American Journal of Mathematics*, vol. 58, N° 2, Baltimore, The Johns Hopkins University Press.
- Dai, H. y otros (1996), “Nanotubes as nanoprobe in scanning probe microscopy”, *Nature*, vol. 384, Houndmills, Nature Publishing Group.
- Damasio, A. (1999), *The Feeling of What Happens. Body and Emotion in the Making of Consciousness*, Nueva York, Harcourt Brace.
- Das, S., A. Chandrakasan y R. Reif (2004), *Timing, Energy, and Thermal Performance of Three-Dimensional Integrated Circuits*, Cambridge, Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology (en línea) <http://www.cs.utah.edu/classes/cs7940-010-rajeev/spr06/papers/das04.pdf>
- David, Paul (1985), “Clio and the economics of QWERTY”, *American Economic Review*, vol. 75, N° 2, Nashville, Tennessee, American Economic Association.
- Davletov, B., M. Bajohrs y T. Binz (2005), “Beyond BOTOX: advantages and limitations of individual botulinum neurotoxins”, *Trends in Neurosciences*, vol. 28, N° 8, Amsterdam, Elsevier.
- Dean, T. y S. Kambhampati (1997), “Planning and scheduling”, *The Computer Science and Engineering Handbook*, A.B. Tucker (ed.), Boca Raton, Florida, CRC press.
- Deary, I. (2001), *Intelligence. A Very Short Introduction*, Nueva York, Oxford University Press.
- Dekleva, S. y otros (2007), “Evolution and emerging issues in mobile wireless networks”, *Communications of the ACM*, vol. 50, N° 6, junio, Washington, D.C., Association for Computing Machinery.
- De León, Ómar (2006), *Análisis crítico del sector de las telecomunicaciones: recomendaciones para el desarrollo de un nuevo modelo regulatorio para Iberoamérica*, Madrid, Asociación Iberoamericana de Centros de Investigación y Empresas de Telecomunicaciones (AHCJET).
- Deloitte (2007a), “TMT predictions”, *Technology, Media & Telecommunications Trends 2007*, Deloitte Touche Tohmatsu.
- _____. (2007b), “TMT predictions”, *Technology, Media & Telecommunications Trends 2007*, Deloitte Touche Tohmatsu.
- Departamento de Comercio de Estados Unidos (2000), “Digital economy 2000” (en línea) <http://ecommerce.gov>.

- _____. (1999), “The emerging digital economy” (en línea) <http://ecommerce.gov>
- _____. (1998), “The emerging digital economy” (en línea) <http://ecommerce.gov>
- Departamento de Energía de Estados Unidos (2006), “Energy perspectives” (en línea) http://www.eia.doe.gov/emeu/aer/ep/ep_frame.html
- Devaney, L. (2007), “Research project uses handheld computers to teach kids math and literacy skills”, *eSchool News*, 31 de enero.
- De Watteville, A. y L. Gilbert (2000), *Information and Communication Technology*, Londres, Heinemann Educational Publishers.
- Diamond Multimedia (2007) (en línea) <http://www.diamondmm.com/>
- Dickson, Andrew (1898), *A History of the Warfare of Science with Theology in Christendom*, Nueva York, D. Appleton & Company.
- Diller, L.H. (1996), “The run on ritalin: attention deficit disorder and stimulant treatment in the 1990s”, *The Hastings Center Report*, vol. 26, N° 2, San Francisco, Universidad de California.
- Disk/Trend Report (1998), “Five decades of disk drive industry firsts” (en línea) <http://www.disktrend.com/5decades2.htm>
- Dobson, J. (2006), “Gene therapy progress and prospects: magnetic nanoparticle-based gene delivery”, *Gene Therapy*, vol. 13, N° 4, Houndmills, Nature Publishing Group.
- Dodson, Edward (1970), “Measurement of state of the art and technological advance”, *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 27, Elsevier.
- Dosi, Giovanni (1988), “Sources, procedures, and microeconomic effects of innovation”, *Journal of Economic Literature*, vol. 26, N° 3, Nashville, Tennessee, American Economic Association, septiembre.
- _____. (1984), *Technical Change and Industrial Transformation: The Theory and an Application to the Semiconductor Industry*, Londres, Macmillan Press.
- Drexler, K. (1993), *La nanotecnología*, Barcelona, Gedisa Editorial.
- _____. (1986), *Engines of Creation: the Coming Era of Nanotechnology*, Nueva York, Anchor Books.
- Drexler, K. y otros (2001), *Many Future Nanomachines: A Rebuttal to Whiteside’s Assertion That Mechanical Molecular Assemblers Are Not Workable and Not A Concern*, Palo Alto, California, Institute for Molecular Manufacturing (en línea) <http://www.imm.org/SciAmDebate2/whitesides.html#ref001>
- Dreyfus, Hubert (1992), *What Computers Still Can’t Do*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press.
- _____. (1972), *What Computers Can’t Do: A Critic of Artificial Reason*, Nueva York, Harper and Row.
- Drucker, Peter (1969), *The Age of Discontinuity: Guidelines to Our Changing Society*, Nueva York, Harper & Row.
- Duan, L., A. Kuzmich y H. Kimble (2003), “Cavity QED and quantum-information processing with “hot” trapped atoms”, *Physical Review A*, vol. 67, N° 032305, College Park, American Physical Society.

- Dubash, Manek (2005), "The inventor of what became Moore's Law gives his views on the 40th anniversary of that Law" (en línea) <http://www.techworld.com/opsys/features/index.cfm?FeatureID=1353> .
- Duda, R., J. Gaschning y P. Hart (1979), "Model design in the PROSPECTOR consultant program for mineral exploration", *Expert Systems in the Microelectronic Age*, D. Michie (ed.), Edimburgo, Edinburgh University Press.
- Duffy, J. (2007), "IMS network face security challenges", *NetworkWorld Magazine*, agosto (en línea) <http://www.networkworld.com/news/2007/050807-next-generation-multimedia.html>
- DVB (Digital Video Broadcasting), "DVB worldwide" (en línea) http://www.dvb.org/about_dvb/dvb_worldwide/index.xml
- Dwivedi, H. (2006), *Securing Storage. A Practical Guide to SAN and NAS Security*, Nueva York, Addison-Wesley.
- Ebbesen, T. y P. Ajayan (1992), "Large-scale synthesis of carbon nanotubes", *Nature*, vol. 358, Houndmills, Nature Publishing Group.
- Economist* (2007), "A world of connections", Special report on telecoms, abril (en línea) <http://www.economist.com/specialreports>
- _____. (2006a), "The phone of the future", noviembre (en línea) http://www.economist.com/science/displayStory.cfm?Story_ID=8312260
- _____. (2006b), "Computers that read your mind", 21 de septiembre (en línea) http://www.economist.com/science/tq/displaystory.cfm?story_id=7904258
- Edel, N. y otros (2004), "Measuring the compressibility of metadata and small files for Disk/NVRAM hybrid storage systems" (en línea) <http://www.cs.ucsc.edu/~nate/spects04-edel.pdf>
- EFMF (2004), "IEEE standard. P802.3ah Ethernet in the first mile over fiber" (en línea) <http://www.ieee802.org/3/efm/>
- Elaine, P. (2007), "Botanical potentials in Alzheimer's disease", *Journal of Alternative and Complementary Medicine*, vol. 13, N° 3, New Rochelle, Mary Ann Liebert Inc.
- Elgersma, Y. (2007), "Genetic engineering cures mice of neurological deficits: prospects for treating Angelman syndrome", *Pharmacogenomics*, vol. 8, N° 6.
- Endo, M. y otros (2001), "Structural characterization of carbon nanofibers obtained by hydrocarbon pyrolysis", *Carbon*, vol. 39, N° 13, Amsterdam, Elsevier Science.
- Enríquez, C.J. (2004), *Mientras el futuro te alcanza: cómo la genómica y otras tecnologías están cambiando tu vida, trabajo, salud y riqueza*, Grijalbo Mondadori.
- Erman, L. y otros (1980), "The hearsay-ii speech understanding system: Integrating knowledge to resolve uncertainty", *ACM Computing Surveys*, vol. 12, N° 2, Nueva York, Association for Computing Machinery.
- Evans, D. (1974), "A new type of magnetic balance", *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 7, N° 4, Bristol, Reino Unido, Institute of Physics.
- Evans, P.D. y otros (2004), "Adaptive evolution of *ASPM*, a major determinant of cerebral cortical size in humans", *Human Molecular Genetics*, vol. 13, N° 5, Nueva York, Oxford University Press.

- Eysenck, H. (2000), *Intelligence: a New Look*, New Jersey, Transaction Publishers.
- Fagien, Steven (2004), “Botox for the treatment of dynamic and hyperkinetic facial lines and furrows: adjunctive use in facial aesthetic surgery”, *Plastic and Reconstructive Surgery*, vol. 112, Arlington Heights, Illinois, American Society of Plastic Surgeons.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) (2001), *Los organismos modificados genéticamente, los consumidores, la inocuidad de los alimentos y el medio ambiente*, Roma (en línea) <http://www.fao.org/DOCREP/003/X9602s/X9602s00.htm>
- Farah, M.J. y otros (2004), “Neurocognitive enhancement: what can we do and what should we do?”, *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 5, N° 5, Houndmills, Nature Publishing Group.
- Farrance, Rex (2006), “Timeline: 50 years of hard drives”, *PC World* (en línea) <http://www.pcworld.com/article/id,127105/article.html>.
- Faulhaber, G. y D. Farber (2002), “Spectrum management: property rights, markets, and the commons”, *Working paper*, N° 02-12, AEI-Brookings Joint Center for Regulatory Studies, Washington, D.C., American Enterprise Institute (en línea) <http://www.aei-brookings.org/admin/authorpdfs/page.php?id=217>
- Feferman, F. y otros (eds.) (1995), “Some basic theorems on the foundations of mathematics and their implications”, *Collected works*, vol. 3, Kurt Gödel, Oxford, Oxford University Press.
- Feldman, Jerome (2006), *From Molecule to Metaphor: A Neural Theory of Language*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press.
- Feldman, Jerome y otros (1988), “Computing with structured connectionist networks”, *Communications of the ACM*, vol. 31, N° 2, Nueva York, Association for Computing Machinery, febrero (en línea) <http://delivery.acm.org/10.1145/50000/42378/p170-feldman.pdf?key1=42378&key2=3916766811&coll=&dl=&CFID=15151515&CFTOKEN=6184618>
- Feigenbaum, E. y J. Feldman (1963), *Computers and Thought*, Nueva York, McGraw-Hill.
- Feynman, R. (1992), “There’s plenty room at the bottom”, *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 1, N° 1, Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)/American Society of Mechanical Engineers, marzo.
- Ficek, Z. y S. Swain (2004), *Quantum Interference and Coherence: Theory and Experiments*, Nueva York, Springer.
- Fiedeler, U. y B. Krings (2006), *Naturalness and neuronal Implants – Changes in the Perception of Human Beings*, EASST Conference, Lausanne, agosto.
- Fischer, J. y otros (2007), “Model-based hybrid tracking for medical augmented reality” *Computers & Graphics*, vol. 31, N° 1, Amsterdam, Elsevier, enero.
- Foresight (2007), “Information, communications & media (ICM)” (en línea) http://kim.foresight.gov.uk/Previous_Rounds/Foresight_1999__2002/Information_Communications_and_Media/Reports/ITEC%20Technologies/Cover.htm#_Toc483719076
- Frank, Michael (2002), “Physical limits of computing”, University of Florida (en línea) <http://www.cise.ufl.edu/~mpf/physlim> .
- Franks, A. (1987), “Nanotechnology”, *Journal of Physics*, vol. 20, N° 12, Bristol, Reino Unido, IOP Publishing Ltd.

- Freeman, Roger L. (2005), *Fundamentals of Telecommunications*, Nueva York, Wiley-IEEE Press.
- . (1975), *Telecommunication Transmission Handbook*, Nueva York, John Wiley & Sons Inc.
- Freeman, Chris y Carlota Perez (1988), "Structural crises of adjustment, business cycles and investment behavior", *Technical Change and Economic Theory*, G. Dosi y otros (eds.), Londres, Pinter Publishers.
- Freeman, Chris y Francisco Louçã (2001), *As Time Goes By. From the Industrial Revolutions to the Information Revolution*, Nueva York, Oxford University Press.
- Freitas, R. (1999), *Nanomedicine, Volume 1: Basic Capabilities*, Austin, Landes Bioscience.
- Friend, C. (1996), "Smart materials: the emerging technology", *Materials World*, vol. 4, Londres, IOM Communications.
- Fuentes, G.P. y A. Slachevsky (2005), "Enfermedad de Alzheimer: actualización en terapia farmacológica", *Revista Médica de Chile*, vol. 133, N° 2, Santiago de Chile, Sociedad Médica de Santiago.
- Funk, K.F. y J. Schmidt (1988), "Cholinergic effects of nootropics", *Biomedica Biochimica Acta*, vol. 47, N° 4-5, Berlin, Akademie-Verlag.
- Ganek, A. y T. Corbi (2003), "The dawning of the autonomic computing era", *IBM Systems Journal*, vol. 42, N° 1, Nueva York, IBM.
- García, F., L. González y S. Alemán (2006), "Pasado, presente y futuro de Internet", *Comunicaciones de Telefónica I+D*, N° 39, La Rioja, Universidad de La Rioja, octubre.
- Gardner, H. (2006), *Inteligencias múltiples. La teoría en la práctica*, Buenos Aires, Editorial Paidós.
- Garretson, C. (2005), "Federal mandate to boost IPv6", *Network World*, enero (en línea) <http://www.networkworld.com/news/2005/080105-ipv6.html>
- Gazzaniga, M.S. (2005), "Smarter on drugs. We recoil at the idea of people taking drugs to enhance their intelligence. But why?", *Scientific American*, Nueva York, Scientific American Inc., octubre.
- Ghezzi, D. y otros (2007), "PhotoMEA: an opto-electronic biosensor for monitoring in vitro neuronal network activity", *Biosystems*, vol. 87, N° 2-3, Amsterdam, Elsevier B.V.
- Giancarlo, P. y S. Giacomo (1989), "Nootropic drugs and brain cholinergic mechanism", *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, vol. 13, Amsterdam, Elsevier.
- Gibson, G. y R. Van Meter (2000), "Network attached storage architecture", *Communications of the ACM*, vol. 43, N° 11, Nueva York, Association for Computing Machinery.
- Ginger, D., H. Zhang y C. Mirkin (2004), "The evolution of dip-pen nanolithography", *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 43, N° 1, Weinheim, Wiley-VCH.
- Giurgea, C.E. (1982), "The nootropic concept and its prospective implications", *Drug Development Research*, vol. 2, N° 5, Nueva York, Wiley-Liss.
- Glenn, M., B. Flanagan y M. Otero (2006), "Good sensors make good fences", *The Edge*, MITRE's Advanced Technology Newsletter, vol. 10, N° 1, Bedford, The Mitre Corporation (en línea) <http://www.mitre.org/edge>

- Glick, B.R. y J.J. Pasternak (2003), *Molecular Biotechnology: Principles & Applications of Recombinant DNA*, Washington, D.C., ASM Press.
- Gödel, Kurt (1931), “Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme”, *Monatshefte für Mathematik und Physik*, vol. 38, Viena, Springer.
- Goldstein, Jeffrey (1999), “Emergence as a construct: history and issues”, *Emergence*, vol. 1, Mansfield, ISCE Publishing.
- Gómez-López, M., J. Preece y F. Stoddart (1996), “The art and science of self-assembling molecular machines”, *Nanotechnology*, vol. 7, N° 3, Bristol, Reino Unido, Institute of Physics Publishing, .
- Goswami, D. (2003), “Optical computing“, *Resonance*, Bangalore, Indian Academy of Sciences (en línea) <http://www.ias.ac.in/resonance/June2003/June2003p56-71.html>
- Gould, S. (1981), *The Mismeasure of Man*, Nueva York, W.W. Norton & Company Inc.
- Gouliaev, A.H. y A. Senning (1994), “Piracetam and other structurally related nootropics”, *Brain Research. Brain Research Reviews*, vol. 19, N° 2, Amsterdam, Elsevier.
- GrabarHDDVD (2006) (en línea) <http://www.grabarhddvd.com/category/hd-dvd/>.
- Gray, Jim (1993), *The Benchmark Handbook for Database and Transaction Systems*, San Francisco, Morgan Kaufmann.
- Gray, Jim y Prashant Shenoy (2000), “Rules of thumb in data engineering”, *Proceedings of the 16th International Conference on Data Engineering*, Washington, D.C., Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Green, C. (2003), “The advantage of near-line storage”, *IT Week* (en línea) <http://www.itweek.co.uk/computing/features/2072268/advantages-near-line-storage>
- Greene, K. (2007a), “Touch screens for many fingers”, *Technology Review*, Cambridge, Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology, febrero (en línea) <http://www.techreview.com/InfoTech/12257/>
- _____. (2007b), “An alternative to the computer mouse”, *Technology Review*, Cambridge, Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology, febrero (en línea) <http://www.techreview.com/InfoTech/18254/>
- Greenfield, A. (2006), *Everyware: the Dawning Age of Ubiquitous Computing*, Berkeley, New Riders.
- Griffiths, Richard T. (s/f), “The history of Internet” (en línea) <http://www.let.leidenuniv.nl/history/ivh/chap2.htm>
- Grillon, C. y otros (2004), “Effects of the beta-blocker propranolol on cued and contextual fear conditioning in humans”, *Psychopharmacology*, vol. 175, N° 3, Berlín, Springer.
- Grochowski, E. (1998), *Emerging Trends in Data Storage on Magnetic Hard Disk Drives*, San Jose, California, IBM Almaden Research Center (en línea) <http://hepd.pnpi.spb.ru/~shevel/DiskTrends-01.011.pdf>
- Grochowski, Ed y Murali Annavaram (2006), “Energy per instruction trends in Intel microprocessors”, *Technology@Intel Magazine*, marzo (en línea) <http://www.intel.com/technology/magazine/research/energy-per-instruction-0306.htm>
- Gruber, Harald (2005), *The Economics of Mobile Telecommunications*, Cambridge, Cambridge University Press.

- Grupo ETC (2003), “La inmensidad de lo mínimo. De los genomas a los átomos” (en línea) <http://www.etcgroup.org/article.asp?newsid=476>
- Guarnieri, F., M. Fliss y C. Bancroft (1996), “Making DNA add”, *Science*, vol. 273, N° 5272, Washington, D.C., American Association for the Advance of Science.
- Haertling, G. (1994), “Rainbow ceramics: a new type of ultra-high-displacement actuator”, *American Ceramic Society Bulletin*, vol. 73, N° 2, Westerville, Ohio, American Ceramic Society.
- Haier, R. y otros (2004), “Structural brain variations and general intelligence”, *NeuroImage*, vol. 23, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- Halal, W. (2004), “The intelligent Internet: the promise of smart computers and e-commerce” (en línea) http://www.gcn.com/online/vol1_no1/26338-1.html
- Halan, M. (2003), “Tele-immersion: virtually here!”, *Information Technology*, agosto.
- Halberstam, D. (1993), *The Best and the Brightest*, Nueva York, Ballantine Books.
- Hall, S. (2003), “Commercialising neuroprotheses: the business of putting the brain back in business”, tesis, Princeton, Universidad de Princeton.
- Halle, M. (1997), “Autostereoscopic displays and computer graphics”, *Computer Graphics*, vol. 31, N° 2, Nueva York, Association for Computing Machinery.
- Han, J. y M. Kamber (2001), *Data Mining: Concepts and Techniques*, San Francisco, Academic Press.
- Harnad, S (2000), “Minds, machines and Turing: the indistinguishability of indistinguishables”, *Journal of Logic, Language, and Information*, vol. 9, N° 4, Dordrecht, Springer.
- Haugeland, J. (1989), *Artificial Intelligence: The Very Idea*, Cambridge, Massachusetts, MIT Press.
- Hanselka, H. (2006), “Adaptronics: responsive and smart”, *Fraunhofer Magazine*, vol. 2, Munich, Fraunhofer Gesellschaft.
- Harris, R. (2005), *Voice Interaction Design: Crafting the New Conversational Speech Systems*, San Francisco, Morgan Kaufmann Publishers.
- Haskins, W. (2007), “IBM, Intel reach chip milestone in dead heat”, TechNewsWorld (en línea) <http://www.technewsworld.com/story/55441.html>
- Hatakeyama, E. (2005), “Modulating effects of Japanese food materials on human brain function”, *Journal of Japanese Society of Nutrition and Food Science*, vol. 58, N° 2.
- Hauptmann, P. (2006), “Selected examples of intelligent (micro) sensor systems: state-of-the-art and tendencies”, *Measurement Science & Technology*, vol. 17, N° 3, Bristol, Reino Unido, Institute of Physics.
- Havenstein, H. (2007), “Sending U.S. soldiers to a ‘virtual Iraq’”, *ComputerWorld*, 27 de febrero.
- Hawkins, Jeff y Sandra Blakeslee (2004), “On intelligence: how a new understanding of the brain will lead to the creation of truly intelligent machines”, Owl books (en línea) <http://www.onintelligence.org/>
- Hawthorne, Nathaniel (1851), *The House of the Seven Gables*, Eldritch Press (en línea) http://www.online-literature.com/hawthorne/seven_gables/17/ .

- Haylor, P. (2006), *Computer Storage: A Manager's Guide*, Victoria, Canadá, Trafford Publishing.
- Haynes, Jim (2001), "Some notes on teletype corporation" (en línea) <http://www.baudot.net/docs/haynes—notes.pdf>
- Hayward, V. y otros (2004), "Haptic interfaces and devices", *Sensor Review*, vol. 24, N° 1, Bingley, Reino Unido, Emerald Group Publishing Ltd.
- Hebb, D. (1949), *The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory*, Nueva York, Wiley & Sons.
- Heller, J.H. y otros (2003), "Donepezil for the treatment of language deficits in adults with Down syndrome: a preliminary 24-week open trial", *American Journal of Medical Genetics. Part A*, vol. 116, N° 2, Nueva York, Wiley-Liss.
- Henshilwood, Christopher y otros (2002), "Emergence of modern human behavior: middle stone age engravings from South Africa", *Science*, vol. 295, N° 5558, Washington, D.C., American Association for the Advance of Science, febrero.
- Hickey, H. (2006), "Researchers demonstrate direct brain control of humanoid robot", University of Washington Office of News and Information, diciembre (en línea) <http://uwnews.washington.edu/ni/article.asp?articleID=28819>
- Hilbert, M. y J. Katz (2003), *Building an Information Society: a Latin American and Caribbean Perspective* (LC/L.1845), Santiago de Chile, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal).
- Hilbert, M. P. López y C. Vásquez (2008), "Methodological Appendix how much info", *online*: <http://www.martinhilbert.net/Appendix-how-much-info.pdf>
- Hillis, W. (1989), *The Connection Machine*, Cambridge, Massachusetts, MIT Press.
- Hinden, R. (1995), "IP next generation overview" (en línea) <http://playground.sun.com/pub/ipng/html/INET-Ipng-Paper.html>
- Hismpamp3.com (2003), "Aplicaciones del estándar MPEG 1" (en línea) <http://www.hispamp3.com/tallermpeg3/tutoriales/mp3profundidad/4.shtml>
- Hitachi (2007), "Hitachi global storage technologies", <http://www.hitachigst.com/hdd/hddpdf/tech/chart01.pdf>
- Hitotsubashi University (2006), "Historical GDP statistics", Tokio, Institute of Economic Research (IER) (en línea) <http://www.ier.hit-u.ac.jp/~kitamura/data/Source/WorldPopulationData.xls>
- Hoag, J. y C. Thompson (2006), "Architecting RFID middleware", *Internet Computing*, vol. 10, N° 5, Washington, D.C., Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Hochberg, L. y otros (2006), "Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia", *Nature*, vol. 442, Houndmills, Nature Publishing Group.
- Hochmuth, P. (2007), "Will Wi-Fi kill wired Ethernet at the LAN edge?", *NetworkWorld Executive Guide*.
- Hodges, A. (2000), "Alan Turing" (en línea) <http://www.turing.org.uk/>.
- Hofstadter, D. (1999), *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid*, edición 20° aniversario, Nueva York, Basic Books.
- __(1979), *Gödel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid. A Metaphorical Fugue on Minds and Machines in the Spirit of Lewis Carroll*, Nueva York, Basic Books.

- Holister, P. y otros (2003), *Nanoparticles*, Technology White Papers, N° 3, Londres, Científica.
- Holzmann, Gerard y Björn Pehrson (2001), *The Early History of Data Networks*, Nueva York, Wiley-IEEE Computer Society Press.
- Hong, R. y otros (2004), “Computación biomolecular: algunos apuntes”, *Revista Cubana de Informática Médica*, N° 1, La Habana, Centro de Cibernética Aplicada a la Medicina.
- Horimai, H. y X. Tan (2006), “Collinear technology for a holographic versatile disk”, *Applied Optics*, vol. 45, N° 5, Washington, D.C., Optical Society of America.
- Horsnell, M. (2005), “Sony takes 3-D cinema directly to the brain”, Times online, abril (en línea) <http://www.timesonline.co.uk/article/0,,2-1557733,00.html>
- Howstuffworks (s/f), “How RAM works” (en línea) <http://computer.howstuffworks.com/ram2.htm>.
- Hoyer, S. y P. Riederer (2007), “Alzheimer disease: no target for statin treatment. A Mini Review”, *Neurochemical Research*, vol. 32, N° 4-5, Amsterdam, Springer.
- Hughes, J. (2004), *Citizen Cyborg: Why Democratic Societies Must Respond to the Redesigned Human of the Future*, Cambridge, Massachusetts, Westview Press.
- Hughes, R. y T. Heinrichs (2004), Quantum Information Science and Technology Roadmap, Universidad de California (en línea) <http://qist.lanl.gov/>.
- Humbeeck, J., D. Reynaerts y J. Peirs (1996), “New opportunities for shape memory alloys for actuators, biomedical engineering, and smart materials”, *Materials Technology*, vol. 11, N° 2, Amsterdam, Elsevier.
- Hurtado, J., J. Lobo y L. Pérez (2006), “Tendencias en capa óptica de red”, *Comunicaciones de telefónica I+D*, N° 38, La Rioja, Universidad de La Rioja, marzo.
- Hybs, I. (1996), “Beyond the interface: a phenomenological view of computer systems design”, *Leonardo*, vol. 29, N° 3, Cambridge, Massachusetts.
- Hynix (s/f), “History”, Hynix Semiconductor (en línea) <http://www.hynix.com/eng/>
- i2010 (2006), *The Challenges of Convergence*, Bruselas, i2010 High Level Group, diciembre.
- IBM (1997), “Kasparov versus Deep Blue, the match”, (en línea) <http://www.research.ibm.com/deepblue>
- IDC (International Data Corporation) (2007), “The expanding digital universe: a forecast of worldwide information growth through 2010” (en línea) http://www.emc.com/about/destination/digital_universe/
- IEEE 802.15 WPA (s/f), “IEEE 802.15 WPAN Task Group (TG1)”, Washington, D.C., Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://www.ieee802.org/15/pub/TG1.html>
- IFPI (2007), “Recorded Music Sales 2000 – 2001- 2002- 2003- 2004- 2005- 2006- 2007” y “Piracy 2000 – 2001- 2002- 2003- 2004- 2005- 2006”, Music Market Statistics (en línea) http://www.ifpi.org/content/section_statistics/index.html
- IHGSC (International Human Genome Sequencing Consortium) (2004), “Finishing the euchromatic sequence of the human genome”, *Nature*, vol. 431, Houndmills, Nature Publishing Group.
- IIBN (Institute for Innovative Blind Navigation) (s/f), “Retinal and cortical chip implants: artificial vision (vision prostheses)” (en línea) <http://www.wayfinding.net/iibnNECtextchip.htm>

- IJET (Instituto de Investigaciones en Electrónica y Telecomunicación de República de Corea) (2005), "Body area networking" (en línea) http://www.boingboing.net/2005/06/23/body_area_networking.html
- Iijima, S. (1991), "Helical microtubules of graphitic carbon", *Nature*, vol. 354, Houndmills, Nature Publishing Group.
- Iijima, S. y otros (1999), "Nano-aggregates of single-walled graphitic carbon nano-horns", *Chemical Physics Letters*, vol. 309, N° 3, Amsterdam, Elsevier.
- Illes, J. y S.J. Bird (2006), "Neuroethics: a modern context for ethics in neuroscience", *Trends in Neuroscience*, vol. 29, N° 9, Amsterdam, Elsevier.
- Intel Corporation (2005), "Excerpts from a conversation with Gordon Moore: Moore's law" (en línea) ftp://download.intel.com/museum/Moores_Law/Video-Transcripts/Excepts_A_Conversation_with_Gordon_Moore.pdf.
- INVENT.AR (2001), (en línea) <http://www.oni.escuelas.edu.ar/2001/cap-fed/inventar/notas/gut.htm>
- Jablonski, Nina y Leslie Aiello (1998), *The Origin and Diversification of Language*, San Francisco, California Academy of Sciences.
- Jacobs, J. (1999), "Smart structures and materials 1999: industrial and commercial applications of smart structures technologies", *Proceedings of SPIE*, vol. 3674, Bellingham, International Society of Optical Engineers.
- Jacobsen, M. (1991), *Developmental Neurobiology*, Nueva York, Plenum Press.
- Jacyna, G. y D. Tromp (2006), "A 'hitchhikers's guide' to netted sensors", *The Edge*, MITRE's Advanced Technology Newsletter, vol. 10, N° 1, Bedford, The Mitre Corporation (en línea) <http://www.mitre.org/edge>
- Jensen, A. (1998), *The g Factor*, Westport, Praeger.
- Jeremy, M.B, J.L. Tymoczko y L. Stryer (2002), *Biochemistry*, Nueva York, Freeman and Co.
- Jerison, H. (2000), "The evolution of intelligence", *Handbook of Intelligence*, R. Sternberg (ed.), Nueva York, Cambridge University Press.
- Jims Journal* (2000), "Do not fold spindle or mutilate", 24 de junio (en línea) <http://www.jim-sjournal.com/jj00/062400.html>.
- Jorgensen, C., K. Wheeler, K. y S. Stepniewski (2000), "Bioelectric control of a 757 class high fidelity aircraft simulator", *NASA Technical Report*, Washington, D.C., Computational Sciences Division.
- Jorgenson, Dale W. y Khuong Vu (2005), "Information technology and the world economy" (en línea) http://www.frbsf.org/economics/conferences/0511/6_ITAndWorldEconomy.pdf
- Johanson, M. (2001), "Stereoscopic video transmission over the Internet", *Second IEEE Workshop on Internet Applications*, Washington, D.C., IEEE Computer Society.
- Johnson, George (2002), *A Shortcut Through Time: The Path to the Quantum Computer*, Nueva York, Borzoi Book.
- Johnson, Steven (2001), *Emergence: the Connected Lives of Ants, Brains, Cities, and Software*, Nueva York, Scribner.

- Jurafsky, D. y J. Martin (2000), *Speech and Language Processing: An Introduction to Natural Language processing, Computational Linguistics, and Speech Recognition*, Upple Saddle River, New Jersey, Prentice-Hall.
- Kahney, L. (2000), "Warwick: cyborg or media doll?", *Wired News*, septiembre (en línea) <http://www.wired.com/news/culture/0,1284,38467,00.html>
- Kant, Immanuel (1781), *Kritik der reinen Vernunft*, Projekt Gutenberg-DE (en línea) <http://projekt.gutenberg.de/kant/krva/krva.htm>
- Kanzaki, R., S. Nagasawa e I. Shimoyama (2005), "Neural basis of odor-source searching behavior in insect brain systems evaluated with a mobile robot", *Chemical Senses*, vol. 30, suplemento 1, Oxford, Oxford University Press.
- Kelly, Kevin (2006), "The singularity is always near", *The Technium* (en línea) http://www.kk.org/thetechnium/archives/2006/02/the_singularity.php .
- _(1997), "The law of plenitude", *New Rules for the New Economy* (en línea) http://www.wired.com/wired/archive/5.09/newrules_pr.html
- Kephart, J. y D. Chess (2003), "The vision of automatic computing", *Computer*, vol. 36, N° 1, Washington, D.C., IEEE Computer Society.
- Kerner, S. (2006), "The road to 100 gigabit Ethernet", *Internet News*, 8 de febrero (en línea) <http://www.internetnews.com/infra/article.php/3583631>
- Kim, S., H. Zhu y R. Zimmermann (2007), "Zoned-RAID", *ACM Transactions on Storage (TOS)*, vol. 3, N° 1, Nueva York, Association for Computing Machinery, marzo.
- King, R. (2003), "Optoelectronic sensors help eliminate human error while providing exact reading, faster results in medical applications", *Drive*, vol. 3, N° 4, agosto-septiembre.
- Kingston Technology (s/f), "Ultimate memory guide" (en línea) <http://www.kingston.com/tools/umg/umg05a.asp>.
- Kish, L. y P. Ajayan (2005), "TerraByte flash memory with carbon nanotubes", *Applied Physics Letters*, vol. 86, N° 9, College Park, Maryland, American Institute of Physics.
- Kjeldskov, J. y J. Paay (2006), "Public pervasive computing: making the invisible visible", *Computer*, vol. 60, N° 9, Washington, D.C., IEEE Computer Society.
- Knightson, K., N. Morita y T. Towle (2005), "NGN architecture: generic principles, functional architecture, and implementation", *Communications Magazine*, vol. 43, N° 10, Washington, D.C., Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), octubre.
- Knopf, G. y otros (2001), "Optoelectronic biosensor for remote monitoring of toxins", *Proceedings of SPIE*, vol. 4190, Bellingham, International Society of Optical Engineers
- Kojima, Takashi (1954), *The Japanese Abacus, Its Use and Theory*, Tokio, Charles E. Tuttle Company (en línea) <http://www.tux.org/~bagleyd/takashikojima1.pdf>
- Kondratieff, Nikolai (1925), *The Major Economic Cycles*, Moscú.
- Kroto, H. (1987), "The stability of the fullerenes C_n, with n = 24, 28, 32, 36, 50, 60 and 70", *Nature*, vol. 329, Houndmills, Nature Publishing Group.
- Kroto, H., A. Allaf y S. Balm (1991), "C₆₀: Buckminsterfullerene", *Chemical Reviews*, vol. 91, Washington, D.C., American Chemical Society.

- Kroto, H. y otros (1985), “C(60): Buckminsterfullerene”, *Nature*, vol. 318, Houndmills, Nature Publishing Group.
- Krugman, Paul (1996), *The Self-Organizing Economy*, Oxford, Blackwell Publishers.
- Kuhn, Thomas (1962), *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago, The University of Chicago Press.
- Kumar, V. (2006), “Potential medicinal plants for CNS disorders: an overview”, *Phytotherapy Research*, vol. 20, N° 12, Nueva York, John Wiley & Sons, Inc.
- Kurzweil, Ray (2005), *The Singularity is Near: When Humans Transcend Biology*, Northampton, Viking Press.
- _____. (2001), “The law of accelerating returns” (en línea) <http://www.kurzweilai.net/articles/art0134.html?printable=1> .
- _____. (1992), *The Age of Intelligent Machines*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press.
- Laird, J., A. Newell y P. Rosenbloom (1987), “Soar: an architecture for general intelligence”, *Artificial Intelligence*, vol. 33, N° 1, Essex, Reino Unido, Elsevier Science Publishers Ltd.
- Lam, W. (2002), “Ensuring business continuity”, *IT Professional*, vol. 4, N° 3, Washington, D.C., IEEE Computer Society.
- Leake, D. (1996), *Case-Based Reasoning: Experiences, Lessons, & Future Directions*, Cambridge, Massachusetts, AAAI Press/MIT Press.
- Lebedev, M. y M. Nicolelis (2006), “Brain-machine interfaces: past, present and future”, *Trends in Neuroscience*, vol. 29, N° 9, Amsterdam, Elsevier (en línea) http://www.nicolelislab.net/NLNet/Load/Papers/TiNS_2006.pdf
- Lederberg, J. (1987), “How DENDRAL was conceived and born”, *Proceedings of the ACM Conference on History of Medical Informatics*, Nueva York, ACM Press.
- Lee, R. y M.J. Balick (2001), “Chocolate: healing food of the gods?”, *Alternative Therapies*, vol. 7, N° 5, Boulder, Colorado, Alternative Therapies in Health and Medicine.
- Lee, E. y otros (2006), *Advancement of Electrochromic Windows*, Berkeley, California Energy Commission.
- Leigh, S. (2004), “Brain growth, life history, and cognition in primate and human evolution”, *American Journal of Primatology*, vol. 62, N° 3, Nueva York, Wiley-Liss.
- Leiner, Barry y otros (1997), “The past and future history of the Internet” (en línea) <http://citeseer.ist.psu.edu/leiner97past.html>
- Lepley, J. (2005), *The Evolution of the Access Network: Options for Fibre Penetration into the Access Network*, Londres, julio (en línea) http://www.ist-muse.org/Documents/NOC2005/Summer_School/Jason_Lepley_Fibre_Penetration_in_XDSL_Networks.pdf
- Lewes, G.H. (1875), *Problems of Life and Mind* , Londres, Trübner.
- Licklider, J. (1960), “Man-computer symbiosis”, *IRE Transactions on Human Factors in Electronics*, vol. HFE-1 (en línea) <http://memex.org/licklider.html>.
- Lieven, M. y otros (2001), “Experimental realization of Shor’s quantum factoring algorithm using nuclear magnetic resonance”, *Nature*, vol. 414, N° 883, Houndmills, Nature Publishing Group.

- Llinás, Rodolfo (2002), *I of the Vortex: From Neurons to Self*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press.
- Lloyd, Seth y Jack Ng (2004), “Black hole computers”, *Scientific American*, Nueva York, Scientific American Inc..
- Long, J. (2006), *Storage Networking Protocol Fundamentals*, Indianápolis, Cisco Press.
- Los, M. (2006), “Plug and play for sensors makes good sense”, *The Edge*, MITRE’s Advanced Technology Newsletter, vol. 10, N° 1, Bedford, The Mitre Corporation (en línea) <http://www.mitre.org/edge>
- Loss, D. y D. DiVincenzo (1998), “Quantum computation with quantum dots”, *Physical Review A.*, vol. 57, College Park, American Physical Society.
- Lu, X. y J. Dai (2006), “Memory effects of carbon nanotubes as charge storage nodes for floating gate memory applications”, *Applied Physics Letters*, vol. 88, College Park, Maryland, American Institute of Physics..
- Lukin, M. y A. Imamoglu (2000), “Nonlinear optics and quantum entanglement of ultraslow single photons”, *Physical Review Letters*, vol. 84, College Park, American Physical Society.
- Luger, G. (2002), *Artificial Intelligence, Structures and Strategies for Complex Problem Solving*, Nueva York, Addison Wesley.
- Lyman, Peter y Hal R. Varian (2000), “How much information 2000”, Berkeley, School of Information Management and Systems, University of California at Berkeley (en línea) <http://www2.sims.berkeley.edu/research/projects/how-much-info/>
- Lyman, Peter, Hal R. Varian y Kirsten Swearingen (2003), “How much information 2003”, Berkeley, School of Information Management and Systems, University of California at Berkeley (en línea) <http://www2.sims.berkeley.edu/research/projects/how-much-info-2003>
- Lynch, G. (2006), “Glutamate-based therapeutic approaches: ampakines”, *Current Opinion in Pharmacology*, vol. 6, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- Lynn, R. (1994), “Some reinterpretations of the Minnesota transracial adoption study”, *Intelligence*, vol. 19, Amsterdam, Elsevier.
- Lynn, R. y T. Vanhanen (2002), *IQ and the Wealth of Nations*, Westport, Praeger.
- Maher, P., T. Akaishi y K. Abe (2006), “Flavonoid fisetin promotes ERK-dependent long-term potentiation and enhances memory”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 103, N° 44, Washington, D.C., National Academy of Sciences.
- Maklin, Y., G. Schön y A. Shnirman (2001), “Quantum-state engineering with Josephson junction devices”, *Reviews of Modern Physics*, vol. 73, College Park, American Physical Society.
- Malik, R. y otros (2007), “Towards better brain management: nootropics”, *Current Medicinal Chemistry*, vol. 14, N° 2, Bentham Science Publishers.
- Mann, S. (1998), “Wearable computing as means for personal empowerment”, First International Conference on Wearable Computing, ICWC-98 (en línea) <http://wearcam.org/icwc-keynote.html>
- Markoff, J. (2007), “A personal computer to carry in the pocket”, *The New York Times*, Nueva York, 8 de enero (en línea) http://www.nytimes.com/2007/01/08/technology/08mobile.html?_r=1&oref=slogin

- Marrazza, G., I. Chianella y M. Mascini (1999), "Disposable DNA electrochemical biosensors for environmental monitoring", *Analytica Chimica Acta*, vol. 387, N° 3, Ámsterdam, Elsevier, B.V.
- Martínez, K. y otros (2006), "Deploying a sensor network in an extreme environment", *Proceedings of Sensor Networks, Ubiquitous and Trustworthy Computing*, provincia china de Taiwán (en línea) <http://www.latimes.com/features/health/la-he-eye16sep16002051.story?null>
- Marxen, H. (2006), "Busy beaver" (en línea) <http://www.drb.insel.de/~heiner/BB/>.
- Mastrangelo, T. (2005), "High fiber diets for providers: health or hardships?", *Telecommunications Americas*, Westerville, Ohio, The Gale Group, julio.
- Masuda, Yoneji (1981), *The Information Society as Post-Industrial Society*, Bethesda, Maryland, World Future Society.
- Maugh II, T. (2002), "Vision for the future. Researchers are on the right track to produce artificial sight for the blind", *Los Angeles Times*, Los Ángeles, 16 de septiembre.
- McCallum, John C. (2001-2007), "Memory and storage graph" (en línea) <http://www.jcmit.com/mem2006.htm>.
- McCarthy, J. (1960), "Recursive functions of symbolic expressions and their computation by machine. Part 1", *Communications of the ACM*, vol. 3, N° 4, Nueva York, Association for Computing Machinery.
- McCarthy, J., M.L. Minsky y N. Rochester (1955), *A Proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence* (en línea) <http://www-formal.stanford.edu/jmc/history/dartmouth/dartmouth.html>
- McCulloch, W. y W. Pitts (1943), "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity", *Bulletin of Mathematical Biophysics*, vol. 5, Nueva York, Springer.
- McKendrick, David (1997), "Sustaining competitive advantage in global industries: technological change and foreign assembly in the hard disk drive industry", La Jolla, California, Information Storage Industry Center.
- McKeown, N. y N. Girod (eds.) (2006), "Clean-slate design for the Internet", white Paper, ver. 2.0, Stanford, Universidad de Stanford, abril.
- McKinsey & Company (2007), "How businesses are using Web 2.0", *The McKinsey Quarterly*, Washington, D.C., marzo.
- McKusick, V.A. (1989), "The Human Genome Organisation: history, purposes and membership", *Genomics*, vol. 5, N° 2, Amsterdam, Elsevier.
- MED-EL (Medical Electronics) (s/f), "Understanding cochlear implants" (en línea) http://www.medel.com/Shared/pdf/en/Medel_uci.pdf
- Medley, M. (2007), "In the future, everything will be a computer", Canada.com network, 19 de mayo (en línea) <http://www.canada.com>
- Mekel-Bobrov, Nitzan y otros (2005), "Ongoing adaptive evolution of ASPM, a brain size determinant in homo sapiens", *Science*, vol. 309, N° 5741, Washington, D.C., American Association for the Advancement of Science.
- Mercuri, R. (2005), "Trusting in transparency", *Communications of the ACM*, vol. 48, N° 5, Washington, D.C., Association for Computing Machinery, mayo.

- Metcalf, R. y D. Boggs (1976), "Ethernet: distributed packet switching for local computer networks", *Communications of the ACM*, vol. 19, N° 5, Washington, D.C., Association for Computing Machinery.
- Meurling, John y Richard Jeans (2001), *The Ericsson Chronicle: 125 Years in Communications*, Estocolmo, Informationsförlaget.
- Michahelles, F. y B. Schiele (2003), "Sensing opportunities for physical interaction", documento presentado en el Workshop on Real World User Interfaces, septiembre.
- Michel, P. (2006), "The busy beaver competitions" (en línea) <http://www.logique.jussieu.fr/~michel/bbc.html>.
- Mielnik, B. (1988), "Ficción científica y relatividad general", *Avance y perspectiva*, vol. 35, México, D.F.
- Minsky, Marvin (1990), "The age of intelligent machines: thoughts about artificial intelligence", KurzweilAI.net (en línea) <http://www.kurzweilai.net/meme/frame.html?main=/articles/art0100.html>
- . (1987), *The Society of Mind*, Nueva York, Simon & Schuster.
- . (1985), *The Society of Mind*, Nueva York, Simon & Schuster.
- Minsky, M. y S. Papert (1969), *Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry*, Cambridge, Massachusetts, MIT Press.
- Mitchell, R. (2006), "Flexible display technologies to provide new twist for computing", Computerworld, julio (en línea) <http://www.computerworld.com/action/article.do?command=viewArticleBasic&articleId=112250>.
- Mitchell, T. (2006), "The discipline of machine learning", Pittsburgh, School of Computer Science, Carnegie Mellon University (en línea) <http://www.ml.cmu.edu/CMU-ML-06-108.pdf>
- . (1997), *Machine Learning*, Nueva York, McGraw Hill.
- Modis, Theodore (2006), "The singularity myth", *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 73, N° 2, Amsterdam, Elsevier (en línea) <http://ourworld.compuserve.com/homepages/tmodis/Kurzweil.htm> .
- . (2002), "Forecasting the growth of complexity and change", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 69, N° 4, Amsterdam, Elsevier (en línea) <http://ourworld.compuserve.com/homepages/tmodis/TedWEB.htm> .
- Monroe, C. (2002), "Quantum information processing with atoms and photons", *Nature*, vol. 416, Houndmills, Nature Publishing Group.
- Montaldo, H.H. (2006), "Genetic engineering applications in animal breeding", *Electronic Journal of Biotechnology*, vol. 9, N° 2, Valparaíso, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Montes Rodríguez, C.J. y otros (2006), "De la restauración neuronal a la reorganización de los circuitos neuronales: una aproximación a las funciones del sueño", *Revista de Neurología*, vol. 43, N° 7, La Rioja, Universidad de La Rioja.
- Moore, G. (1965), "Cramming more components onto integrated circuits", *Electronics*, vol. 38, N° 8, abril.

- Mora, F. (2005), *Cómo funciona el cerebro*, Madrid, Alianza Editorial, S.A.
- Moravec, H. (2003), "Robots, after all", *Communications of the ACM*, vol. 46, N° 10, Nueva York, Association for Computing Machinery, octubre.
- . (1988), *Mind Children: the Future of Robot and Human Intelligence*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press.
- . (1983), "The Stanford cart and the CMU Rover", *Proceedings of the IEEE*, vol. 71, N° 7, Nueva York, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Morgan Stanley (2006), "Q1 2006 global technology data book" (en línea) http://www.morganstanley.com/institutional/techresearch/pdfs/global_techdatabook0306.pdf
- Morris, R. y B. Truskowski (2003), "The evolution of storage systems", *IBM Systems Journal*, vol. 42, N° 2, Nueva York, IBM.
- Motorola Media Center (2002), "Motorola Sets Another Broadband-Industry Milestone with Landmark 10 Millionth Cable Modem Shipment" (en línea) http://www.motorola.com/mediacenter/news/detail.jsp?globalObjectId=2178_1767_23&page=archive
- Moulton, Pete (2001), *The Telecommunications Survival Guide*, Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall.
- Müller, B. (2004), "Adaptronics: bringing materials to life", *Fraunhofer Magazine*, vol. 1, Munich, Fraunhofer-Gesellschaft.
- Muller, N. (2002), *Networking A to Z*, Nueva York, McGraw-Hill Professional.
- Mulhall, D. (2002), *Our Molecular Future*, Nueva York, Prometheus Books.
- Murakami, T. y A. Kamimura (2004), *Optical Lithography*, Patent number 6780572, (en línea) <http://www.freepatentsonline.com/6780572.html>
- Naam, R. (2005), *More than Human: Embracing the Promise of Biological Enhancement*, Nueva York, Broadway Books.
- Nader, K., G.E. Schafe y J.E. Le Doux (2000), "Fear memories require protein synthesis in the amygdala for reconsolidation after retrieval", *Nature*, vol. 406, Houndmills, Nature Publishing Group.
- Negroponte, Nicholas (1995), *Being Digital*, Nueva York, Vintage Books.
- Neisser, U. (1967), *Cognitive Psychology*, Englewood Cliff, New Jersey, Prentice Hall.
- Neisser, U. y otros (1996), "¿Intelligence: knowns and unknowns", *American Psychologist*, vol. 51, N° 2, Washington, D.C., American Psychological Association.
- Nelson, Richard y Sidney Winter (1982), *An Evolutionary Theory of Economic Change*, Cambridge, Harvard University Press.
- . (1977), "Dynamic competition and technical progress", *Economic Progress, Private Values and Public Policies: Essays in Honour of W. Fellner*, B. Balassa y R. Nelson (eds.), Amsterdam, North Holland.
- Neuman, P. (2004), "The big picture", *Communications of the ACM*, vol. 47, N° 9, Nueva York, Association for Computing Machinery, septiembre.
- Nevill-Manning, C. e I. Witten (1999), "Protein is incompressible", *Proceedings of the Data Compression Conference*, Los Alamitos, California, IEEE Press.

- Newell, A. y H. Simon (1972), *Human Problem Solving*, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall.
- Newmann, U. y C. Kyriakakis (2004), “2020 Classroom”, *Vision 2020. Transforming Education and Training Through Advanced Technologies*, USA Secretary of Commerce and Secretary of Education.
- Newman, D.J., G.M. Cragg y K.M. Snader (2003), “Natural products as sources of new drugs over the period 1981-2002”, *Journal of Natural Products*, vol. 66, N° 7, American Chemical Society.
- Nicolelis, Miguel (2001), “Actions from thoughts”, *Nature*, vol. 409, N° 6818, Houndmills, Nature Publishing Group (en línea) http://www.nicolelislab.net/NLNet/Load/Papers/NATR_0101.pdf
- Nielsen, M. e I. Chuang (2000), *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge, Cambridge University Press.
- NM2 (2007), “The future of media production”, New Millennium, New Media (en línea) <http://www.ist-nm2.org>
- Nordhaus, W.D. (2006), *An Economic History of Computing*, New Haven, Departamento de Economía, Universidad de Yale (en línea) http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/computing_June2006.pdf.
- . (2002), *The Progress of Computing*, New Haven, Departamento de Economía, Universidad de Yale.
- North, Douglass (1981), *Structure and Change in Economic History*, Nueva York, W.W. Norton & Company.
- O’Brien, D. (2004), “Computers prove weak at faces”, *The Baltimore Sun*, Baltimore, septiembre.
- OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) (2006a), *Information Technology Outlook 2006*, París.
- . (2006b), *Workshop “The Future of the Internet” Proceedings*, París.
- . (2006c), *OECD Broadband Statistics to June 2006*, París (en línea) http://www.oecd.org/document/9/0,2340,en_2649_34223_37529673_1_1_1_1,00.html
- . (2002), *Frascati Manual: Proposed Standard Practice for Surveys on Research and Experimental Development*, París (en línea) <http://www1.oecd.org/publications/e-book/9202081E.PDF>
- OCDE/Eurostat (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos/Oficina de Estadísticas de las Comunidades Europeas) (2005), *Oslo Manual: Guidelines for Collecting and Interpreting Innovation Data*, París, Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE).
- Odlyzko, Andrew (2000), *The History of Communications and its Implications for the Internet*, AT&T Research Labs, junio.
- . (1998a), *The Economics of the Internet: Utility, Utilization, Pricing and Quality of Service*, AT&T Research Labs, julio.
- . (1998b), *The Size and Growth Rate of the Internet*, AT&T Research Labs, octubre.

- Oemer, B. (2002), "Classical concepts in quantum programming" (en línea) <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0211100v2>
- Ogihara, M. y A. Ray (1997), "Simulating boolean circuits on a DNA computer", *Proceedings of the First Annual International Conference on Computational Molecular Biology*, Nueva York, Association for Computing Machinery.
- O'Hanlon, Charlene (2006), "A conversation with Jordan Cohen", *ACM Queue*, vol. 4 N° 6, Nueva York, Association for Computing Machinery, julio-agosto.
- O'Hannion, C. (2006), "Able bodies", *ACM Queue*, vol. 4, N° 6, Nueva York, Association for Computing Machinery, julio-agosto.
- Okita, S.Y., J. Bailenson y D.L. Schwartz (2007), "The mere belief of social interaction improves learning", *Proceedings of the Twenty-ninth Meeting of the Cognitive Science Society*, Nashville, agosto (en línea) <http://www.stanford.edu/~bailenso/papers/pp745-okita%5b1%5d.pdf>
- Oliver, J. (1996), "Computation with DNA-matrix multiplication", *2nd Annual Meeting on DNA Based Computers*, Princeton, Universidad de Princeton.
- Onural, L. y otros (2006), "An assessment of 3DTV technologies", NAB BEC Proceedings (en línea) <http://www.3dtv-research.org/publicDocs/publications/OnuralNAB06Assessment.pdf>
- OSTA (Optical Storage Association) (2002), "Rewritable technology roadmap" (en línea) <http://www.osta.org/technology/pdf/mo.pdf>
- Ozelli, K.L. (2007), "This is your brain on food", *Scientific American Digital*, Nueva York, Scientific American Inc., septiembre.
- Packan, P. (1999), "Device physics: pushing the limits", *Science*, vol. 285, N° 5436, Washington, D.C., American Association for the Advancement of Science.
- Palet, J. (2003), "Addressing the digital divide with IPv6-enabled broadband power line communications", *ISOC Member Briefing Series*, N° 13, Virginia, The Internet Society (en línea) <http://www.isoc.org/briefings/013/>.
- Palmer, R. (1999), *Maintenance Planning and Scheduling Handbook*, Nueva York, McGraw-Hill Professional.
- Papelnet.cl (s/f), "Historia del papel" (en línea) http://www.papelnet.cl/papel/historia_papel.htm.
- Paragios, N., Y. Chen y O. Faugeras (2005), *The Handbook of Mathematical Models and Computer Vision*, Nueva York, Springer.
- Patrick, M. (2007), "We can see clearly now", *Government Computer News*, vol. 26, N° 14, junio, Falls Church, Government Information Group.
- Patterson, D., G. Gibson y R. Katz (1988), *A Case for Redundant Arrays of Inexpensive Disks (RAID)*, Berkeley, Universidad de California.
- Pearl, J. (2000), *Causality: Models, Reasoning, and Inference*, Cambridge, Massachusetts, Cambridge University Press.
- Pelzer, S., A. Vente y A. Bechthold (2005), "Novel natural compounds obtained by genome-based screening and genetic engineering", *Current Opinion in Drug Discovery & Development*, vol. 8, N° 2, Filadelfia, Thomson Reuters.

- Peng, H. y otros (2006), "Ultra-high frequency nanotube resonators", *Physical Review Letters*, vol. 97, N° 087203, College Park, American Physical Society.
- Penrose, Roger (1996), "Beyond the doubting of a shadow", *Psyche*, vol. 2, N° 23 (en línea) <http://psyche.cs.monash.edu.au/v2/psyche-2-23-penrose.html>.
- . (1989), *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds and The Laws of Physics*, Nueva York, Oxford University Press.
- Pepeu, G. y G. Spignoli (1989), "Nootropic drugs and brain cholinergic mechanisms", *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, vol. 13, Suppl:S77-88, Amsterdam, Elsevier.
- Pérez, Carlota (2002), *Technological Revolutions and Financial Capital: The Dynamics of Bubbles and Golden Ages*, Cheltenham, Edward Elgar Publishing.
- . (2001), "Cambio tecnológico y oportunidades de desarrollo como blanco móvil", *Revista de la Cepal*, N° 75, LC/G.2150-P, Santiago de Chile.
- _____. (1983), "Structural change and assimilation of new Technologies in the economic and social systems" (en línea) <http://www.carlotaperez.org/papers/basic-structuralchange.htm>.
- Perio, A. y otros (1989), "Specific modulation of social memory in rats by cholinomimetic and nootropic drugs, by benzodiazepine inverse agonists, but not by psychostimulants", *Psychopharmacology*, vol. 97, N° 2, Berlin, Springer.
- Peters, M. (1995), "Does brain size matter? A reply to Rushton and Ankney", *Canadian Journal of Experimental Psychology*, vol. 49, N° 4, Ottawa, Ontario, Canadian Psychological Association.
- . (1992), *Biotechnology: A Guide to Genetic Engineering*, Dubuque, William C. Brown.
- Peters, A., T. Wei y P. Kwiat (2004), "Mixed state sensitivity of several quantum information benchmarks", *Physical Review A*, vol. 70, N° 052309, College Park, American Physical Society
- Piaget, J. (1999), *La psicología de la inteligencia*, Barcelona, Crítica.
- Pierce, John (1981), *An Introduction to Information Theory: Symbols, Signals and Noise*, segunda edición revisada, Nueva York, Dover Publications.
- . (1980), *An Introduction to Information Theory: Symbols, Signals and Noise*, Nueva York, Dover Publications.
- Polanyi, Michael (1966), *The Tacit Dimension*, Nueva York, Doubleday & Co.
- Pomerleau, D. (1989), *ALVINN: An Autonomous Land Vehicle in a Neural Network*, San Francisco, Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- Porter, Jim (1998), "Disk drives' evolution" (en línea) <http://www.disktrend.com/pdf/portrpk.pdf>
- Potrykus, I. (2001), "Golden rice and beyond", *Plant Physiology*, vol. 125, Honolulu, American Society of Plant Biologists.
- Pozas Álvarez, J. y M. Sánchez (2006), "Acceso fijo: perspectivas de evolución", *Comunicaciones de Telefónica I+D*, N° 68, La Rioja, Universidad de La Rioja, abril.
- PRIMA (Perception, Recognition and Integration for Interactive Environments) (s/f), "Project PRIMA-II. Perception of Action for Multi-modal Interaction", INRIA Research Team (en línea) <http://www-prima.imag.fr/prima/pub/prima/presentation.php>

- Purves, D. y otros (2001), *Neuroscience*, Sinauer Associates Inc., Sunderland, Massachusetts.
- Raichle, M.E. y M.A. Mintun (2006), "Brain work and brain imaging", *Annual Review of Neuroscience*, vol. 29, Palo Alto, California, Annual Reviews.
- Ramaekers, J.G. (2006), "Drugs promoting wakefulness and performance", *Current Pharmaceutical Design*, vol. 12, N° 20, Bentham Science Publishers.
- Ramanathan, R.M y M. Agan (2006), "Intel energy-efficient performance", Intel Corporation (en línea) <http://download.intel.com/technology/eep/overview-paper.pdf>.
- Raychaudhuri, D. y M. Gerla (eds.) (2005), *New Architectures and Disruptive Technologies for the Future Internet*, NSF Wireless Mobile Planning Group Workshop Report, New Brunswick, agosto.
- Redl, Siegmund M., Matthias K. Weber y Malcolm W. Oliphant (1998), *GSM and Personal Communications Handbook*, Londres, Artech House.
- Rejeski, D. (2004), "The future of sensors: a conversation with David Rejeski", *Earth Observation Magazine*, Frederick, GITC America Inc., octubre.
- Renugopalakrishnan, V. y otros (2007), "Future memory storage technology: protein-based memory devices may facilitate surpassing Moore's Law", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, N° 2, febrero, IEEE Magnetics Society.
- Resnick, Mitchel (1997), *Turtles, Termites, and Traffic Jams: Explorations in Massively Parallel Microworlds*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press.
- Rheingold, H. (2000), *Tools for Thought: The History and Future of Mind-Expanding Technology*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press.
- Riley, H. (1987), *The Von Neumann Architecture of Computer Systems*, Pomona, California State Polytechnic University (en línea) <http://www.csupomona.edu/~hnriley/www/VonN.html>
- Robinson, T. (2005), "The race for space", *netWorker*, vol. 9, N° 2, Nueva York, Association for Computing Machinery.
- Robles-De-La-Torre, G. (2006), "The importance of the sense of touch in virtual and real environments", *IEEE MultiMedia*, vol. 13, N° 3, Washington, D.C., IEEE Computer Society.
- Roco, M. (2005), "The Challenge of Transforming and Responsible Nanotechnology", Herdon, Virginia, International Electronic Manufacturing Initiative (iNEMI), 16 de septiembre (en línea) http://www.nsf.gov/crssprgm/nano/reports/nni_05_0916_inemi_transfrespnt.pdf
- Rolfe, B. (2004), *Toward Nanometer-Scale Sensing Systems: Natural and Artificial Noses Models for Ultra-Small, Ultra-Dense Sensing Systems*, Virginia, The MITRE Corporation, noviembre (en línea) <http://www.mitre.org/technology/nanotech>
- Romer, K. y F. Mattern (2004), "The design spade of wireless sensor networks", *IEEE Wireless Communications*, vol. 11, Nueva York, IEEE Communications Society.
- Rosenberg, Nathan (1982), *Inside the Black Box: Technology and Economics*, Cambridge, Massachusetts, Cambridge University Press.
- _____. (1976), "On technological expectations", *The Economic Journal*, vol. 86, N° 343, Oxford, Reino Unido, Blackwell Publishing.

- _____. (1969), "The direction of technological change: inducement mechanisms and focusing devices", *Economic Development and Cultural Change*, vol. 18, N° 1, Chicago, The University of Chicago Press.
- _____. (1963), "Technological change in the machine tool industry, 1840-1910", *The Journal of Economic History*, vol. 23, N° 4, Cambridge, Massachusetts, Cambridge University Press.
- Ruiz-Franco, J.C. (2005), *Drogas inteligentes. Plantas, nutrientes y fármacos para potenciar el intelecto*, Madrid, Paidotribo.
- Rushton, J. (1995), *Race, Evolution, and Behavior: a Life History Perspective*, New Brunswick, Transaction Publishers.
- Rushton, J. y C. Ankney (2000), "Size matters: a review and new analyses of racial differences in cranial capacity and intelligence that refute Kamin and Omari", *Personality and Individual Differences*, vol. 29, N° 3, Amsterdam, Elsevier.
- Rushton, J. y E. Rushton (2003), "Brain size, IQ, and racial-group differences: Evidence from musculoskeletal traits", *Intelligence*, vol. 31, Amsterdam, Elsevier.
- Russell, Peter (1999), "The global brain" (en línea) <http://www.peterussell.com/GB/global-brain.php>
- Russell, S. y P. Norvig (2002), *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, Englewood.
- Sacerdoti, E. (1974), "Planning in a hierarchy of abstraction spaces", *Artificial Intelligence*, vol. 5, N° 2, Essex, Reino Unido, Elsevier Science Publishers Ltd.
- Sackmann, S., J. Strüker y R. Accorsi (2006), "Personalization in privacy-aware highly dynamic systems", *Communications of the ACM*, vol. 49, N° 9, Washington, D.C., Association for Computing Machinery, septiembre.
- Sahal, Devendra (1985a), "Technological guideposts and innovation avenues", *Research Policy*, vol. 14, N° 2, Amsterdam, Elsevier.
- _____. (1985b), "Foundations of technometrics", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 27, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- _____. (1981), *Patterns of Technological Innovation*, Reading, Massachusetts, Addison-Wesley.
- _____. (1978), *Law-like Aspects of Technological Development*, Berlin, International Institute of Management.
- Salem, H. y N. Mohamed (2006), "Middleware challenges and approaches for wireless sensor networks", *IEEE Distributed Systems Online*, vol. 7, N° 3, Washington, D.C., IEEE Computer Society.
- Saltzer, J., D. Reed y D. Clark (1984), "End-to-end arguments in system design", *ACM Transactions on Computer Systems*, vol. 2, N° 4, Nueva York, Association for Computing Machinery.
- San Jose Research Center (s/f), "Hitachi global storage technologies" (en línea) http://www.hitachigst.com/hdd/hddpdf/tech/hdd_technology2003.pdf.
- Sánchez, F. (2006), "Convergencia de tecnologías: nuevas oportunidades para el avance de la informática y de las ciencias biomédicas", *Revista Salud.com*, vol. 2, N° 6.
- Sawyer, R. (2006), *The Cambridge Handbook of the Learning Sciences*, Nueva York, Cambridge University Press.

- Saykin, A.J. (2007), "Brain imaging and behavior: progress and opportunities", *Brain Imaging Behavior*, vol. 1, N° 1-2, Nueva York, Springer.
- Sayre, K. (1993), *Three More Flaws in the Computational Model*, APA Annual Conference, Chicago, Illinois.
- Schalk Gerwin y otros (2004), "BCI2000: a general-purpose brain-computer interface (BCI) system", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 51, N° 6, Piscataway, New Jersey, IEEE Engineering in Medicine and Biological Society (en línea) <http://www.bciresearch.org/paper.pdf>.
- Schaller, Robert (2004), "Technological Innovation in the Semiconductor Industry: A Case Study of the International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)", George Mason University.
- Schank, R. (1972), "Conceptual dependency: a theory of natural language understanding", *Cognitive Psychology*, vol. 3, N° 4, Amsterdam, Elsevier B.V.
- Schindler, U., D.K. Rush y S. Fielding (1984), "Nootropic drugs: animal models for studying effects on cognition", *Drug Development Research*, vol. 4, N° 5, Nueva York, Wiley-Liss.
- Schmidt, Glen (2005), "Seagate-Quantum: encroachment strategies. Case article" (en línea) <http://ite.pubs.informs.org/Vol5No2/SchmidtVanMieghem/index.php>
- Schmookler, Jacob (1966), *Invention and Economic Growth*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press.
- Schmorrow, D. y A. Kruse (2004), "Augmented cognition", *Berkshire Encyclopedia of Human-Computer Interaction*, W.S. Baingridege (ed.), Great Barrington, Massachusetts, Berkshire Publishing Group.
- Schreer, O., P. Kauff y T. Sikora (eds.) (2005), *3D Video communication. Algorithms, Concepts and Real-time Systems in a Human Centered Communication*, New Jersey, John Wiley & Sons.
- Schummer, J. (2004), "Multidisciplinary, interdisciplinary, and patterns of research collaboration in nanoscience and nanotechnology", *Scientometrics*, vol. 59, N° 3, Dordrecht, Springer, marzo.
- _____. (1939), *Business Cycles*, Nueva York, McGraw-Hill.
- _____. (1934), *The Theory of Economic Development*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press.
- Schutzberg, Adena (2004), "The future of sensors: a conversation with David Rejeski", *Earth Observation Magazine*, Frederick, GITC America Inc, octubre.
- Schwartz, Mischa (1994), *Redes de telecomunicaciones: protocolos, modelado y análisis*, Buenos Aires, Addison-Wesley Iberoamericana.
- Searle, J. (1999), *Mind, Language and Society: Philosophy in the Real World*, Londres, Phoenix.
- _____. (1992), *The Rediscovery of the Mind*, Cambridge, Massachusetts, MIT Press.
- _____. (1980), "Minds, brains and programs", *Behavioral and Brain Science*, vol. 3, N° 3, Cambridge, Massachusetts, Cambridge University Press (en línea) <http://members.aol.com/NeoNoetics/MindsBrainsPrograms.html>.
- Searle, John (1984), *Minds, Brains and Science*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press.

- Seelig, G. y otros (2006), "Enzyme-free nucleic acid logic circuits", *Science*, vol. 314, Washington, D.C., American Association for the Advancement of Science.
- Seitz, G. y otros (2004), "EUV microlithography: a challenge for optical metrology", *Fourth International Conference on Solid State Lighting*, Proceedings of SPIE, vol. 5530, Bellingham, International Society of Optical Engineers.
- Selman, A. (1994), "A taxonomy of complexity classes of functions", *Journal of Computer and System Sciences*, vol. 48, N° 2, Amsterdam, Elsevier.
- Sensen, C. (ed.) (2005), *Handbook of Genome Research: Genomics, Proteomics, Metabolomics, Bioinformatics, Ethical and Legal Issues*, Nueva York, Wiley.
- Seseña, Julián (2007), "DVB-T, una opción válida y eficiente para la televisión digital en Chile" (en línea) <http://www.camara.cl/aindex/browsers/jornadas/II%20Seminario%20de%20Telecomunicaciones/1.%20Normas%20Tecnicas/DVB-T%20Sr.%20Julian%20Sese%20F1a.pdf>
- Shafer, G. y J. Pearl (1990), *Readings in Uncertain Reasoning*, San Francisco, Morgan Kaufmann Publishers.
- Shahinpoor, M. y otros (1998), "Ionic polymer-metal composites (IPMCs) as biomimetic sensors, actuators and artificial muscles – a review", *Smart Materials and Structures*, vol. 7, N° 6, Bristol, Reino Unido, IOP Publishing Limited diciembre.
- Shannon, Claude (1950), "Programming a computer for playing chess", *Philosophical Magazine*, vol. 41, N° 314, Londres, Taylor & Francis, marzo.
- . (1948), "A mathematical theory of communication", *Bell System Technical Journal*, vol. 27, New Jersey, John Wiley & Sons (en línea) <http://cm.bell-labs.com/cm/ms/what/shannonday/shannon1948.pdf>.
- . (1937), "A symbolic analysis of relay and switching circuits", Cambridge, Massachusetts, Department of Electrical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, (en línea) <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/11173>.
- Shannon, Claude y Warren Weaver (1949), *The Mathematical Theory of Communication*, Illinois, University of Illinois.
- Shapiro, Carl y Hal Varian (1999), *Information Rules: A Strategic Guide to the Network Economy*, Cambridge, Massachusetts, Harvard Business School Press.
- Shawn J. y otros (2006), "Alzheimer's disease", *Current Topics in Medicinal Chemistry*, vol. 6, N° 6, Bentham Science Publishers.
- Sherman, C. (ed.) (1994), *The CD-ROM Handbook*, Nueva York, McGrawHill, Inc.
- Shor, P. (2005), *Progress in Quantum Algorithms*, Cambridge, Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology (en línea) <http://www-math.mit.edu/~shor/papers/Progress.pdf>
- Shortliffe, E. (1974), *MYCIN: A Rule-Based Computer Program for Advising Physicians Regarding Microbial Therapy Selection*, Stanford, Universidad de Stanford.
- Simon, H. (1965), *The Shape of Automation for Men and Management*, Nueva York, Harper and Row.
- Simon, H. y A. Newell (1958), "Heuristic problem solving: the next advance in operations research", *Operations Research*, vol. 6, N° 1, Linthicum, Maryland, Inform.

- Simonite, T. (2007a), "Vibrating vest could send alerts to soldiers", *NewScientTech*, enero (en línea) <http://www.newscientisttech.com/article/dn10846-vibrating-vest-could-send-alerts-to-soldiers.html>
- _____. (2007b), "Emotion-aware teaching software tracks student attention", *NewScientTech*, enero (en línea) http://www.newscientisttech.com/article.ns?id=dn10894&feedId=onlinenews_rss20
- SIS (s/f), "History" (en línea) http://www.sis.com/aboutsis/aboutsis_index02.htm.
- Smith, R. (2005), *Smart Material Systems: Model Development. Frontiers in Applied Mathematics*, Filadelfia, Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Song, Z. y C. Sun (2004), "Quantum information storage and state transfer based on spin systems" (en línea) http://arxiv.org/PS_cache/quant-ph/pdf/0412/0412183v1.pdf
- SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation) (s/f), "SPEC's Benchmarks and Published Results" (en línea) <http://www.spec.org/benchmarks.html>.
- Specialized Systems Software, Inc. (s/f), "Uso del papel en las oficinas" (en línea) <http://www.specsyssoft.com/fineprint/empresas.htm>
- Stallings, William (2007), *Data and Computer Communications*, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall.
- Stancheva, S.L. y otros (1991), "Age-related changes of the effects of a group of nootropic drugs on the content of rat brain biogenic monoamines", *General Pharmacology*, vol. 22, N° 5, Amsterdam, Elsevier.
- Stanley, R. (2007), "An introduction to neuroethics: part 1. The values of ethics and the neurosciences", *British Journal of Neuroscience Nursing*, vol. 3, N° 3, Londres, MA Healthcare Ltd.
- Sternberg, R. (1985), *Beyond IQ: A Triarchic Theory of Human Intelligence*, Nueva York, Cambridge University Press.
- Sternberg, R. y D. Detterman (eds.) (1986), *What is Intelligence? Contemporary View Points on its Nature and Definition*, Norwood, New Jersey, Ablex.
- Stetter, J., W. Penrose y S. Yao (2003), "Sensors, chemical sensors, electrochemical sensors, and ECS", *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 150, N° 2, The Electrochemical Society.
- Strauss, S.H. (2003), "Genetic technologies: genomics, genetic engineering, and domestication of crops", *Science*, vol. 300, Washington, D.C., American Association for the Advancement of Science.
- Subirana, B. y M. Bain (2006), "Legal programming", *Communications of the ACM*, vol. 49, N° 9, Washington, D.C., Association for Computing Machinery, septiembre.
- Tabuchi, H. (2007), "Hitachi: move the train with your brain", Associated Press, junio (en línea) <http://www.abcnews.go.com/Technology/wireStory?id=3305001>
- Talbot, D. (2005a), "The Internet is broken", *Technology Review*, Washington, D.C., Massachusetts Institute of Technology, diciembre (en línea) http://www.technologyreview.com/read_article.aspx?id=16051&ch=infotech
- _____. (2005b), "The next Internet", *Technology Review*, Washington, D.C., Massachusetts Institute of Technology, diciembre (en línea) <http://www.technologyreview.com/Infotech/16077/page1/>

- Talbot, Michael (1991), *The Holographic Universe*, Nueva York, Harper Collins.
- Tanenbaum, A. (2001), *Modern Operating Systems*, Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall.
- . (1996), *Computer Networks*, New Jersey, Prentice Hall Inc.
- Taniguchi, N. (1974), “On the basic concept of ‘nano-technology’”, *Proceedings of the International Conference on Production Engineering*, Tokio, Japan Society of Precision Engineering.
- Tapscott, D. (1996), *The Digital Economy: Promise and Peril in the Age of Networked Intelligence*, Nueva York, McGraw-Hill.
- Tate, J., F. Lucchese y R. Moore (2006), *Introduction to Storage Area Networks*, Nueva York, IBM Redbooks (en línea) <http://www.redbooks.ibm.com/redbooks/pdfs/sg245470.pdf>
- Taylor, J., M. Johnson y C. Crawford (2006), *DVD Demystified*, Nueva York, McGraw-Hill/TAB Electronics.
- Textoscientificos.com (s/f), “Historia del papel” (en línea) <http://www.textoscientificos.com/papel/historia>.
- Theunissen, E. y otros (2004), “Integration of imaging sensor data into a synthetic vision display”, *Digital Avionics Systems Conference (DASC 04)*.
- Thomas, S. (2005), “Pervasive, persuasive eLearning: modeling the pervasive learning space”, *Proceedings of the Pervasive Computing and Communications Workshops 2005*, Washington, D.C., IEEE Computer Society
- Thrun, S. y otros (1999), “MINERVA: A second-generation museum tour-guide robot”, *Proceedings of the 1999 International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, Washington, D.C., Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Tiana, C., J. Kerr y S. Harrah (2001), “Multispectral uncooled infrared enhanced-vision system for flight test”, *SPIE Proceedings series*, vol. 4363, Bellingham, International Society of Optical Engineers
- TigerDirect.com (2007), “PAL, NTSC or SECAM” (en línea) <http://www.tigerdirect.com/static/html/pal-ntsc-secam.html>
- Topol, A. y otros (2006), “Three-dimensional integrated circuits”, *IBM Journal of Research and Development* (en línea) <http://www.research.ibm.com/journal/rd/504/topol.html>
- Toshiba (s/f), “Historical timeline” (en línea) <http://www.tacp.toshiba.com/swf/history/history.swf>.
- Tour, J. y otros (2003), “Nanocell electronic memories”, *Journal of the American Chemical Society*, vol. 125, N° 43.
- T-RAM Company History (en línea) http://www.t-ram.com/about/T-AM_Company_History.pdf.
- Tucker, J. (1984), “Gene machines: the second wave”, *High Technology*.
- Tuomi, I. (2002) ‘The lives and death of Moore’s law,’ *First Monday*, noviembre 2002, at http://firstmonday.org/issues/issue7_11/tuomi .
- Turhan, C. y otros (2007), “Neuroethics and national security”, *American Journal of Bioethics*, vol. 7, N° 5, Londres, Routledge.

- Turing, Alan (1950), "Computing machinery and intelligence", *Mind*, vol. 59, N° 236, Oxford, Reino Unido, Oxford University Press.
- . (1937), "On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem", *Proceedings of the London Mathematical Society*, vol. 42, Londres, London Mathematical Society (en línea) <http://www.turingarchive.org/browse.php/B/12> .
- Turner, A., I. Karube y G. Wilson (1990), *Biosensors: Fundamentals and Applications*, Nueva York, Oxford University Press.
- Tuszynski, Mark y otros (2002), "Growth factor gene therapy for Alzheimer disease", *Neurosurgical Focus*, vol. 13, N° 5, Charlottesville, Virginia, American Association of Neurological Surgeons.
- UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) (2007), "Definiciones de los indicadores de las telecomunicaciones/TIC mundiales" (en línea) http://www.itu.int/ITU-D/ict/material/IndDef_s_v2007.doc
- . (2006), *World Information Society Report 2006*, Ginebra (en línea) <http://www.itu.int/pub/S-POL-WSIS.RPT-2006/en>
- . (2005), *ITU Internet Report 2005: The Internet of Things*, Ginebra (en línea) <http://www.itu.int/osg/spu/publications/internetofthings/>
- _____. (2004), "Radio spectrum management for a converging world", documento presentado en el "Workshop on Radio Spectrum Management for a Converging World", febrero.
- . (s/f), "World Telecommunications Database", Ginebra (en línea) <http://www.itu.int/ITU-D/ict/statistics/>
- Uldrich, J. (2005), "IBM: a very small bright light (en línea) <http://www.fool.com/News/mft/2005/mft05112920.htm?ref=foolwatch>
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) (2005), *Towards Knowledge Societies, Unesco World Report*, París (en línea) <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001418/141843e.pdf>
- . (1982), *Mexico City Declaration on Cultural Policies. World Conference on Cultural Policies* (México, D.F., 26 de julio al 6 de agosto de 1982).
- Universidad Politécnica de Madrid (2004), "Sistemas de Acceso Óptico: Nueva Generación de ADSL", Madrid.
- U.S. Securities and Exchange Commission (2007) (en línea) <http://www.sec.gov/Archives/edgar/data/936734/0000936734-99-000001.txt>
- Utku, S. (1998), *Theory of Adaptive Structures: Incorporating Intelligence into Engineered Products*, Boca Ratón, Florida, CRC Press.
- Utterback, James y W. Abernathy (1975), "A dynamic model of process and product innovation", *Omega*, vol. 3, N° 6.
- Van Weenen, J. (1995), "Sustainable product development and waste management", *Proceedings of the National Conference on Local Agenda 21*, Dublin Castle.
- Vander Veen, C. (2007), "3D you", *Government Technology*, enero (en línea) <http://www.govtech.net/magazine/story.print.php?id=103598>

- Varki, A. y T.K. Altheide (2005), “Comparing the human and chimpanzee genomes: searching for needles in a haystack”, *Genome Research*, vol. 15, Woodbury, Nueva York, Cold Spring Harbor Laboratory Press.
- Vázquez, J. y otros (2006), “Perspectivas de evolución de los sistemas radio”, *Comunicaciones de Telefónica I+D*, N° 38, La Rioja, Universidad de La Rioja, abril.
- Venter, J.C. y otros (2001), “The sequence of the human genome”, *Science*, vol. 291, Washington, D.C., American Association for the Advancement of Science.
- Vernon, M.W. y E.M. Sorkin (1991), “Piracetam. An overview of its pharmacological properties and a review of its therapeutic use in senile cognitive disorders”, *Drugs & Aging*, vol. 1, N° 1, Adis.
- Vernon, P. y otros (2000), “The neuropsychology and psychophysiology of human intelligence”, *Handbook of Intelligence*, R. Sternberg (ed.), Cambridge, Cambridge University.
- Vinge, Vernor (1993), “Technological Singularity”, San Diego, San Diego State University (en línea) <http://www.ugcs.caltech.edu/~phoenix/vinge/vinge-sing.html>
- Vlaho, J. (2005), “The quest for a smart pill. Will drugs make us smarter and happier?”, *Popular Science*, 31 de julio.
- Von Neumann, John (2000), *The Computer and the Brain*, Yale, Yale University Press.
- _____. (1945), *First Draft of a Report on the EDVAC*, Filadelfia, Moore School of Electrical Engineering, University of Pennsylvania (en línea) <http://www.virtualtravelog.net/entries/2003-08-TheFirstDraft.pdf> .
- Von Baeyer, Hans Christian (2004), *Information: The New Language of Science*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press.
- Waclawsky, J. (2005), “IMS: a critique of the grand plan”, *Business Communications Review*, abril (en línea) http://www.bcr.com/equipment/briefing/ims:_a_critique_of_the_grand_plan_200510011016.htm
- Waldrop, M. (2003), “Natural language processing”, *Technology Review*, Cambridge, Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology, febrero (en línea) <http://www.techreview.com/InfoTech/12257/>
- Wang, L. y otros (2006), “High-performance transparent inorganic–organic hybrid thin-film n-type transistors”, *Nature Materials*, vol. 5, Houndmills, Nature Publishing Group.
- Wang, S. y otros (2005), “Consolidation and reconsolidation of incentive learning in the amygdala”, *The Journal of Neuroscience*, vol. 25, N° 4, Washington, D.C., Society for Neuroscience.
- Wang, Y. y D. Liu (2004), “Discovering the capacity of human memory”, *Brain and Mind*, vol. 4, N° 2, Nueva York, Springer.
- Warnerbros (2003), “What is the Matrix“ (en línea) <http://whatisthematrix.warnerbros.com> .
- Waterhouse, A.L., J.R. Shirley y J.L. Donovan (1996), “Chocolate: as hearty as red wine”, *The Lancet*, vol. 348, Amsterdam, Elsevier.
- Watson, I. (1997), *Applying Case-Based Reasoning: Techniques for Enterprise Systems*, San Francisco, Morgan Kaufmann.
- Watson, J. (1998), *Behaviorism*, New Brunswick, Transaction Publishers.

- Watson, J.D. y F.H.C. Crick (2003), "Molecular structure of nucleic acids. A structure for deoxyribose nucleic acid", *American Journal of Psychiatry*, vol. 160, Arlington, American Psychiatric Association.
- _____. (1953), "A structure for deoxyribose nucleic acid", *Nature*, vol. 171, Houndmills, Nature Publishing Group.
- Webster, Frank (1995), *Theories of the Information Society*, Nueva York, Routledge.
- Wechsler, D. (1997), *Manual for the Wechsler Adult Intelligence Scale, III*, Nueva York, Psychological Corporation.
- Weinberger, D. (2002), *Small Pieces Loosely Joined: A Unified Theory of the Web*, Nueva York, Perseus Books.
- Weiner, Herb (1998), "Marilyn is tricked by a game show host", Kitchen Wisdom Publishing (en línea) <http://www.wiskit.com/marilyn.gameshow.html>.
- Weingartner, H. (1985), "Drugs that facilitate cognitive processes: characterizing the response", *Drug Development Research*, vol. 5, N° 1, Nueva York, Wiley-Liss.
- Weiser, M. (1991), "The computer for the 21st century", *Scientific American*, vol. 265, N° 3, Nueva York, Scientific American Inc.
- Westermann, K.H., J. Schmidt y U. Bucher (1981), "Effects of nootropic drugs on dopaminergic systems in the CNS", *Polish Journal of Pharmacology and Pharmacy*, vol. 33, N° 4, Cracovia, Institute of Pharmacology, Polish Academy of Sciences.
- Wetterbom, A. y otros (2006), "Comparative genomic analysis of human and chimpanzee indicates a key role for indels in primate evolution", *Journal of Molecular Evolution*, vol. 63, N° 5, Nueva York, Springer-Verlag.
- White, S. y otros (2001), "Autonomic healing of polymer composites", *Nature*. Vol. 409. N° 6822, Houndmills, Nature Publishing Group.
- Whitesides, M. (2001), "The once and future nanomachine", *Scientific American*, vol. 285, Nueva York, Scientific American Inc.
- Wiener, Norbert (1948), *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and Machine*, Nueva York, Wiley.
- Wikipedia (2007) (en línea) http://en.wikipedia.org/wiki/Rio_PMP300
- _____. (s/f), "MIPS" (en línea) <http://es.wikipedia.org/wiki/MIPS>.
- Wiley, Gordon y Philip Phillips (1958), *Method and Theory in American Archaeology*, Tuscaloosa, University of Alabama Press.
- Willner, I., B. Basnar y B. Willner (2007), "Nanoparticle-enzyme hybrid systems for nanobiotechnology", *FEBS Journal*, vol. 274, N° 2, Oxford, Blackwell Publishing.
- Wilson, M. y otros (2002), *Nanotechnology. Basic Science and Emerging Technologies*, Londres, Chapman & Hall/CRC.
- Wolkow, R. (2005), "Nanoscale informatics and communication technologies", Calgary, Alberta, Informatics Circle of Research Excellence.
- Wolpaw, Jonathan y otros (2002), "Brain-computer interfaces for communication and control", *Clinical Neurophysiology*, vol. 113, N° 6, Amsterdam, Elsevier (en línea) <http://www.neuro-it.net/Education/Summerschool2004/Babiloni/Wolpaw%202002.pdf>.

- Woods, W. (1972), *The Lunar Sciences Natural Language Information System: Final Report*, Cambridge, Massachusetts, Bolt Beranek and Newman Inc.
- . (1970), “Transition network grammars for natural language analysis”, *Communications of the ACM*, vol. 13, N° 10, Nueva York, Association for Computing Machinery.
- Wool, R. (2001), “*Polymer science: a material fix*”, *Nature*, vol. 409, N° 6822, Houndmills, Nature Publishing Group.
- Wright, P. (1998), “Knowledge discovery in databases: tools and techniques” (en línea) <http://www.acm.org/crossroads/xrds5-2/kdd.html>
- Yin, J. y otros (1995), “CREB as a memory modulator: induced expression of a dCREB2 activator isoform enhances long-term memory in drosophila”, *Cell*, vol. 81, N° 1.
- Yockey, Hubert (2005), *Information Theory, Evolution, and the Origin of Life*, Nueva York, Cambridge University Press.
- Zacks, R. (2004), “Portable projectors”, *Technology Review*, vol. 107, N° 10, Cambridge, Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology.
- Zangara, A. (2003), “Huperzine A: an alkaloid with nootropic and neuroprotective properties”, *Current Topics in Nutraceutical Research*, vol. 1, N° 3, Coppell, Texas, New Century Health Publishers.
- Zeilinger, Anton (1999), “A foundational principle for quantum mechanics”, *Foundations of Physics*, vol. 29, N° 4, Amsterdam, Springer Netherlands.
- Zeiss, C. (2005), “Advances in EUV lithography” (en línea) <http://www.zeiss.com/C1256A770030BCE0/WebViewAllE/D6279194C2955B2EC12570CF0044E537>
- Zhang, S. (2005), “Designing novel materials and molecular machines”, *EJournal USA* (en línea) <http://usinfo.state.gov/journals/ites/1005/ijee/zhang.htm>
- . (2003), “Fabrication of novel biomaterials through molecular self-assembly”, *Nature Biotechnology*, vol. 21, N° 10.
- Zhongkin, Y., H. Lang y M. Diventra (2003), “Effect of geometry and doping on the operation of molecular transistors”, *Applied Physics Letters*, vol. 82, College Park, Maryland, American Institute of Physics.
- Zhu, H. y otros (2002), “Direct synthesis of long single-walled carbon nanotube strands”, *Science*, vol. 296, N° 5569, Washington, D.C., American Association for the Advancement of Science, mayo.
- Zollmann, S., T. Langlotz y O. Bimber (2006), *Passive-Active Geometric Calibration for View-Dependent Projections onto Arbitrary Surfaces*, Weimar, Bauhaus University Weimar.
- Wootters, W. y W. Zurek (1982), “A single quantum cannot be cloned”, *Nature*, vol. 299, Houndmills, Nature Publishing Group.
- 3G Americas (2005), *The Evolution of UMTS/HSDPA - 3GPP Release 6 and Beyond*, White Paper, diciembre (en línea) http://www.3gamericas.org/pdfs/UMTS_Rel6_Beyond-Dec2005.pdf

AGRADECIMIENTOS

A finales de 2006 y principios de 2007 se realizaron entrevistas con reconocidos expertos de Europa, Estados Unidos y América Latina, con el fin de identificar tendencias y temas de interés, probar y reconfirmar hipótesis y darle rumbo a un campo que se caracteriza por el dinamismo y la incertidumbre. Los dos principales autores de este estudio desean expresar su agradecimiento a los 34 especialistas nombrados más abajo por su tiempo, paciencia y buena disposición. Si bien no todos los temas explorados y abordados han sido incluidos en el presente texto, los autores no hubieran podido abarcar este amplio terreno de conocimiento sin la valiosa contribución de los mencionados profesionales. Por supuesto que ninguno de ellos es responsable de los posibles errores o imprecisiones que se hayan incluido en esta versión final del libro:

James Anderson. Profesor de ciencias cognitivas y lingüísticas, especializado en las aplicaciones de las redes neuronales a la ciencia cognitiva, Universidad de Brown, Estados Unidos.

Jeremy Bailenson. Director del Virtual Human Interaction Lab (Laboratorio de Interacción Humana Virtual), profesor adjunto de ciencias de la comunicación, Universidad de Stanford, Estados Unidos.

Carlos Baratti. Director del Laboratorio de Neurofarmacología de los Procesos de Memoria, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Guillermo Bertora. Especialista en neurofisiología otoofthalmológica, Argentina.

Caio Bonilha. Director de Brampton Telecom, Brasil.

Eric A. Brewer. Profesor de informática, Universidad de California en Berkeley, Estados Unidos.

José M. Carmena. Profesor adjunto de ingeniería eléctrica e informática, especializado en interfaces cerebrales. Universidad de California en Berkeley, Estados Unidos.

Juan Ignacio Cirac Sasturain. Director del Instituto Max Planck para la Óptica Cuántica, Garching, Alemania. Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica 2006.

Gustavo Deco. Institución Catalana de Investigación y Estudios Avanzados (ICREA), Universidad Pompeu Fabra, Cataluña, España.

Renata Dutra. Dirección de Relaciones Corporativas de Latinoamérica, Telefónica, España.

Jerry Feldman. Profesor de ingeniería eléctrica e informática y miembro del Institute for Cognitive and Brain Science (Instituto de Ciencias Cognitivas y Cerebrales), Universidad de California en Berkeley, Estados Unidos.

Roderic Guigó. Coordinador de los programas de bioinformática y genómica, Centro de Regulación Genómica, Cataluña, España.

Karen Hallberg. Instituto Balseiro, Centro Atómico Bariloche. Investigadora del Conicet. Premio Guggenheim Fellowship, 2005, Argentina.

Marc Hauser. Profesor de psicología, biología organísmica y evolutiva, y antropología biológica. Investigador principal del Primate Cognitive Neuroscience Laboratory (Laboratorio de Neurociencia Cognitiva de Primates) Universidad de Harvard, Estados Unidos.

Carlos Hirsch Ganievich. Director de aspectos regulatorios de Iusacell, presidente de Ahciet Móvil y consultor de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) en México.

José Jiménez Delgado. Director de estrategia de la innovación, Telefónica, España.

David Lazer. Director del programa sobre gobernanza coordinada, profesor adjunto en la John F. Kennedy School of Government (Facultad de Políticas Públicas), Universidad de Harvard, Estados Unidos.

Ramón López de Mántaras. Director del Instituto de Investigación de Inteligencia Artificial del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) en España, y presidente de la International Joint Conference on Artificial Intelligence (Conferencia Internacional Conjunta sobre Inteligencia Artificial) (IJCAI-07).

Peter Lyman. Profesor de gestión de la información y sistemas, Universidad de California en Berkeley, Estados Unidos.

Geoffrey S. Kirkman. Director adjunto del Instituto Watson de Estudios Internacionales; editor del Global Information Technology Report (Informe Mundial sobre Tecnología de la Información) 01-02, Universidad de Brown, Estados Unidos.

Marcelo Knoebel. Laboratorio de Materiales y Bajas Temperaturas, Departamento de Física de la Materia Condensada, Universidad Estatal de Campinas (Unicamp), Brasil.

Alberto Kornblihtt. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires; investigador del Conicet en Argentina; becario internacional de investigación del Instituto Médico Howard Hughes, 2006-2007.

Colin Maclay. Director gerente del Centro Berkman para Internet y la Sociedad en la Facultad de Derecho de la Universidad de Harvard, Estados Unidos.

Peter Möckel. Director gerente del laboratorio de Deutsche Telekom, Berlín, Alemania.

Diego Molano Vega. Director de relaciones corporativas en Latinoamérica, Telefónica, España.

Salvador Pérez Crespo. Gerente de desarrollo de la sociedad de la información, Telefónica, España.

Enrique Ruspini. Científico principal, Artificial Intelligence Center (Centro para el Desarrollo de la Inteligencia Artificial), Instituto de Investigación de Stanford (SRI, por su sigla en inglés de Stanford Research Institute), Estados Unidos.

AnnaLee Saxenian. Decana y profesora en la Facultad de la Información y profesora en el Departamento de Planificación Urbana y Regional en la Universidad de California en Berkeley, Estados Unidos.

Gilson Schwartz. Director académico de la Ciudad del Conocimiento en el Instituto de Estudios Avanzados de la Universidad de São Paulo, Brasil.

Humberto Terrones Maldonado. Director de la División de Materiales Avanzados, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), México. SNI Nivel-III.

Mauricio Terrones Maldonado. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), México. SNI Nivel-III. Premio Nacional de Química 2000. Premio TWAS The Third World Academy of Sciences (2005).

Manuel Vázquez. Director del Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, CSIC Canto Blanco. Gestor de la Acción Estratégica en Nanociencia y Nanotecnología del Ministerio de Educación y Ciencia, España.

Pablo Vidales. Científico investigador principal, Deutsche Telekom, Berlín, Alemania.

Darrell West. Profesor de políticas públicas y ciencias políticas, especializado en políticas de tecnología, gobernanza digital y medios de comunicación, Universidad de Brown, Estados Unidos.