

Naciones Unidas

Comisión Económica  
para América Latina

Banco Interamericano  
de Desarrollo

---

Programa BID/CEPAL  
Sobre Investigación en  
Temas de Ciencia y Tecnología  
Monografía de Trabajo Nº 19

INGENIERIA DE DISEÑO Y  
CAMBIO TECNICO ENDOGENO

Un enfoque microeconómico  
basado en la experiencia  
de las industrias química  
y petroquímica argentinas

Francisco Colman Sercovich

Distr.  
Restringida  
BID/CEPAL/BA/29  
Agosto, 1978  
ORIGINAL: ESPAÑOL

El Dr. Francisco Colman Sercovich -graduado en Economía en la Universidad de Sussex, Inglaterra- se ha desempeñado hasta julio de 1978 como investigador a tiempo completo del Programa BID/CEPAL en Temas de Ciencia y Tecnología, con sede en las oficinas de CEPAL en Argentina.

El autor desea agradecer a los Ingenieros Anello, R., Aristía, M., Bravo, J.A., Dietrich, R., Fumbarg, V., Mattio, R.A., Pequiai, M., Orsi, D.A., Sangiovanni, A., Valls, R.H., y Vázquez, A.R. y a los Dres. Cambiaggio, H.P.L., Craig, R.A., Fuentealba, J.G. y Mange, J., por el desinteresado y estimulante aporte de su larga y fructífera experiencia. También agradece los valiosos comentarios de los Dres. Katz, J. y Canitrot, A. y del Sr. Maxwell, P. Se aplica el descargo de rigor.

Oficina de la CEPAL en Buenos Aires  
Cerrito 264 - 5° piso  
1010 - Buenos Aires - Argentina

# I N D I C E

	pág.
I. Introducción .....	1
I.1 Naturaleza del proceso de cambio técnico. Su interpretación como marco para el estudio .....	2
I.2 El enfoque adoptado .....	5
II. El problema a la luz de dos casos contrastantes .....	13
II.1 Un caso de flexibilidad .....	13
II.2 Un caso de inflexibilidad .....	15
II.3 Una evaluación comparativa .....	16
II.4 Hacia un marco interpretativo. Implicaciones para la investigación.....	18
III. Capacidad efectiva y capacidad nominal; sobrediseño y subdiseño: dilucidación de conceptos .....	19
III.1 Capacidad nominal y capacidad efectiva .....	19
III.2 Alcances del análisis habitual. Amplitud del problema ..	22
III.3 Sobrediseño y subdiseño .....	24
III.4 Las condiciones iniciales de diseño .....	27
IV. La función de sobrediseño .....	33
-IV.1 Naturaleza del diseño de procesos .....	33
IV.2 Variables que influyen en la determinación de los criterios de diseño .....	36
IV.3 Interacción entre las variables explicativas de la propensión al sobrediseño. La función de sobrediseño en su conjunto .....	46
V. Dimensionamiento de plantas .....	49
V.1 Funciones de costo según procesos y escalas .....	49
V.2 La sensibilidad a escala .....	52
VI. La rentabilidad del sobrediseño .....	61
VI.1 La determinación del margen de sobrediseño más rentable ..	61
VI.2 Nota: especificación de la función de costos .....	65

	pág.
VII. Sobrediseño y aprendizaje .....	71
VII.1 Optimización y ruptura de cuellos de botella .....	71
VII.2 Curvas de Aprendizaje y condiciones iniciales de diseño ....	77
VIII. Aprendizaje en el diseño de plantas .....	85
VIII.1 Ingeniería de diseño y elección de técnicas .....	85
VIII.2 Progreso técnico en el diseño de plantas .....	86
IX. Algunas implicaciones de política .....	95
IX.1 Interdependencia entre la negociación y la generación de tecnologías .....	95
IX.2 La generación de capacidad de ingeniería como producción conjunta .....	96
IX.3 Imperfecciones, apropiabilidad del conocimiento y política de promoción .....	97
Apéndice A .....	101
PGM .....	101
1. Secuencia de procesamiento .....	101
2. Descripción del proceso .....	101
3. Financiamiento .....	104
4. Forma de contratación.....	104
5. Condiciones iniciales de diseño .....	106
6. Performance técnica y esfuerzos de ingeniería de planta .....	107
Apéndice B .....	111
Petrosur .....	111
1. Secuencia de procesamiento .....	111
2. Descripción del proceso .....	111
3. Forma de contratación .....	112
4. Financiamiento .....	112
5. Condiciones iniciales de diseño .....	112

	pág.
6. Performance técnica y esfuerzos de ingeniería de planta .....	113
Apéndice C .....	119
Ingeniería de mejora en una planta de etileno .....	
Apéndice D .....	125
Copolímeros Graft .....	125
Poliestireno expandido .....	126
Bibliografía .....	129

#### INDICE DE CUADROS

1. Sobrediseño: intervalos de referencia .....	25
2. Procedimiento seguido en la práctica industrial para el diseño de algunos tipos de aparatos considerando la incertidumbre .....	38
3. Coeficientes típicos para el costo de items de equipo .....	54

#### INDICE DE GRAFICOS

1. ....	25
2. ....	55
3. ....	58
4. ....	59
5. ....	66
6. ....	66
7. ....	67
8. ....	67
9. ....	73
10. ....	75
11. ....	90

GRAFICOS DEL APENDICE A

pág.

Esquema de procesos de Petroquímica Graal. Mosceni ..... 103

1. .... 108

GRAFICOS DEL APENDICE B

1. .... 114

GRAFICOS DEL APENDICE C

Flow-sheet original simplificado planta etileno ..... 122

## I. INTRODUCCION

Esta monografía contiene un estudio de las condiciones necesarias al desarrollo de una capacidad organizada e independiente de ingeniería de diseño de procesos.

Si bien se inspira en la experiencia de las industrias química y petroquímica en un país de desarrollo industrial intermedio (Argentina), podrán desprenderse implicaciones directas para países en muy diversos estadios de industrialización, especialmente en lo que respecta a algunos aspectos básicos de la economía del diseño.

El desarrollo de la capacidad de ingeniería de diseño es uno de los requisitos fundamentales para la movilización del potencial innovativo de un país. Por mucha capacidad creativa de que se disponga, si no llegan a dominarse las disciplinas, métodos, procedimientos y recursos que permitan de manera organizada, consumir la metamorfosis de ideas potencialmente buenas en contribuciones concretas al acervo productivo, escaso será el provecho social que se derive. Aquí hay dos dimensiones que interesa distinguir.

Una se refiere a aquellas innovaciones que se expresan en mejoras adaptativas a una planta dada -o a una generación dada de plantas- durante el curso de su vida operativa. Dichas innovaciones se realizan por medio de esfuerzos no rutinarios de ingeniería de planta y expresan un gradual aprendizaje tecnológico localizado en la planta.

La segunda dimensión concierne a aquellas contribuciones que revisten la forma de innovaciones en el diseño de plantas -o de sucesivas generaciones de plantas-. Ellas traducen progresos en términos de mejores diseños a medida que aumenta el número de plantas diseñadas, y expresan un progresivo aprendizaje tecnológico de los planteles de ingeniería de diseño.

Ambos tipos de contribuciones se entrelazan en un sendero temporal de mejoras tecnológicas, que se nutre con el aprendizaje agregado en ingeniería de planta, por un lado, e ingeniería de diseño, por el otro.

Ese proceso de aprendizaje tiene un punto obligado de partida. Se trata del nivel de conocimiento alcanzado hasta el momento inicialmente considerado. Tal nivel se traduce en condiciones específicas de la estructura productiva, el perfil de pericia técnica que le corresponde, los conocimientos requeridos para operarla y un conjunto de expectativas respecto de los cambios que puedan introducirse en estas variables en el futuro.

Tales condiciones iniciales configuran el telón de fondo que condiciona y que, junto al sistema de precios, emite señales que guían el curso de los aportes innovativos a través del tiempo.

Así, el desarrollo de la capacidad de ingeniería de diseño de procesos que acompaña al proceso de maduración industrial en el largo plazo, se encuentra íntimamente asociado a la orientación y ritmo del cambio tecnológico. Sin una interpretación de la naturaleza del cambio tecnológico, a partir de condiciones iniciales específicas, sería difícil contribuir al esclarecimiento del tema de nuestra investigación.

Por consiguiente, partimos de la ubicación del área bajo estudio en el contexto de una interpretación de la microeconomía del cambio técnico. A continuación, especificamos el enfoque adoptado a partir de esa ubicación. Tal el contenido del primer capítulo.

En el capítulo II se examinan los aspectos relativos a condiciones de diseño y performance técnica de planta que el estudio de campo señala como centrales para el abordaje del tópico investigado. En seguida, se delinearán las principales cuestiones que quedan sugeridas para su estudio en los capítulos siguientes.

El capítulo III se consagra a la discusión de un conjunto de definiciones de conceptos tales como capacidad efectiva y margen de sobrediseño, que surgen a partir de la evidencia empírica y resultan necesarios a los efectos del análisis posterior. Estos conceptos no se encuentran fácilmente en la literatura corriente sobre el tema.

En el capítulo IV se discuten los aspectos esenciales de la actividad de diseño de procesos. Se especifica la 'función de sobrediseño' por medio de la cual se intenta explicar qué variables determinan el margen de flexibilidad o potencial adaptativo que se le confiere a un proceso en la fase de diseño.

El capítulo V aborda los criterios de dimensionamiento de plantas de proceso, como una de las determinaciones esenciales del diseño.

En el capítulo VI se considera la determinación del margen de sobrediseño más rentable.

El capítulo VII trata el tema del aprendizaje tecnológico en planta, vinculando la trayectoria mejorativa resultante con las condiciones iniciales de diseño.

Con el beneficio de la discusión de los capítulos precedentes, se encara en el capítulo VIII el examen de la naturaleza del proceso de aprendizaje de las firmas de ingeniería dedicadas al diseño de plantas de proceso.

En el capítulo final se sintetizan las principales conclusiones que se desprende del estudio, así como las implicaciones que de ellas resultan a los efectos de una política de promoción de la capacidad nacional organizada de ingeniería de diseño de procesos.

### I.1. Naturaleza del proceso de cambio técnico. Su interpretación como marco para el estudio

Durante el curso de los últimos quince años se ha realizado una serie de esfuerzos teóricos y empíricos orientados hacia el desarrollo de un enfoque endógeno del cambio técnico <sup>1/</sup>. Estos esfuerzos respondieron a una creciente conciencia respecto de las dificultades resultantes de tratar de explicar el

---

<sup>1/</sup> Entre los estudios teóricos, véanse, por ejemplo: Arrow, K.J., (1962); Levhari, D., (1966); Sheshinski, E., (1967); Atkinson, A.B. y Stiglitz, J.E., (1969); Rosenberg, N., (1976); Nelson, R. y Winter S., (1977). Estudios aplicados incluyen: David, P., (1970); Rapping, L., (1965); y Baloff, N., (1967).

cambio técnico en términos de la teoría recibida. Las quejas al respecto confluyeron en dos aspectos centrales: (i) la relevancia de los mecanismos inductores en relación al sesgo ahorrador de factores (mano de obra y capital) del cambio técnico, y (ii) la asimilación del cambio técnico con traslaciones de la función de producción 2/.

Los esfuerzos hacia la explicación del cambio técnico adoptaron, por tanto, nuevas direcciones, dando lugar a nuevos conceptos y abriendo nuevos rumbos para la investigación teórica y aplicada. De hecho, probaron ser de utilidad en el tratamiento de tales aspectos -anteriormente desvinculados de factores técnicos- como: (i) análisis del timing de las innovaciones; (ii) conexión entre innovaciones específicas y el crecimiento resultante en la productividad de los recursos, y (iii) evaluación de la tasa y dirección de la difusión de innovaciones a través de la economía (Rosemberg, N., (1976)).

Pueden identificarse como aspectos principales de estos nuevos rumbos investigativos a los siguientes:

- (i) un apartamiento del concepto schumpeteriano de la innovación;
- (ii) una distinción entre el estadio introductorio de una innovación y el subsiguiente estadio de difusión que implica modificaciones y mejoras a la innovación original;
- (iii) el proceso de aprendizaje tecnológico;
- (iv) el concepto de innovación localizada; y
- (v) un enfoque heurístico de la actividad innovativa.

Frente a un trasfondo intelectual sesgado hacia innovaciones que implican saltos basados en conocimiento científico del mayor grado de generalidad, un número de estudios empíricos ha mostrado concluyentemente la importancia de las innovaciones menores 3/.

---

2/ Salter, entre otros, cuestionó la afirmación de Hicks, según la cual: "un cambio en los precios relativos de los factores de producción es, en sí mismo, un estímulo a la invención, y a la invención de un tipo particular: dirigido a economizar el uso de aquel factor que se ha tornado relativamente más caro" (Hicks, 1932, pp. 124-125). Salter argumentó persuasivamente que, bajo condiciones competitivas, la firma individual simplemente no está interesada en el particular sesgo ahorrador de factores del mejoramiento técnico, sino en ahorrar costos totales. La asimilación del cambio técnico a traslaciones de la función de producción también ha sido sujeta a fuertes críticas. Los supuestos de isocuantas continuas para el rango completo de posibilidades de producción y la de disponibilidad inmediata de alternativas técnicas a costo nulo, también fueron consideradas altamente artificiales. En la medida que técnicas elegibles ante variadas condiciones económicas implican un proceso incierto y costoso, la distinción entre movimientos a lo largo de la frontera de posibilidades de producción y movimientos en la frontera puede ser inadecuada. Posteriores desarrollos del enfoque neoclásico, vgr. el concepto de la 'frontera de posibilidades de innovación', o la de una 'función de producción fundamental' poco lograron en términos de mejorar el valor explicativo de la teoría recibida por cuanto los supuestos básicos se mantuvieron inalterados. Salter, W., (1960) y Kennedy, C., (1964).

3/ Ver, por ejemplo,.: Hollander, S., (1965); Shishko, R., (1972); Enos, J.L., (1958); Katz, J., (1975).

Estas envuelven cualquier cambio no trivial en procesos y productos e implican nuevos conocimientos tecnológicos o ingenieriles de naturaleza específica y particular.

Mientras que el estadio introductorio de una innovación (primer uso a nivel comercial) puede implicar reducciones de costos respecto de técnicas previas "best-practice", subsecuentes mejoras, en gran medida a través de esfuerzos de ingeniería no rutinaria de planta aunque también vía firmas de ingeniería de diseño, con frecuencia originan pasos relativamente más importantes hacia la reducción de costos. De hecho, el proceso de difusión no es entendido como una mera adopción de una innovación por un número creciente de firmas, sino como un proceso acumulativo de mejoras y adaptaciones que pertenecen a la fase post-introductoria de una innovación. Así, la actividad inventiva es descripta como un proceso acumulativo gradual donde, en general, las continuidades son mucho más importantes que las discontinuidades (Rosemberg, *Ibid*, p. 192).

La etapa post-introductoria de avance tecnológico no es visualizada, por tanto, como el cierre del estadio inventivo, sino como la inauguración de un nuevo período de aprendizaje. Este período ha sido investigado recurriendo a modelos de "learning by doing" y de "learning by spending". Aun cuando estos enfoques no han alcanzado todavía plena madurez y han merecido algunas críticas (Chipman, J.S., 1970), han abierto promisorias perspectivas para la investigación, habiendo ya dado lugar a importantes frutos tanto a nivel teórico como empírico (ver llamada 1/).

El principal producto resultante del aprendizaje tecnológico incremental tanto a nivel de planta como del plantel de diseño de ingeniería consiste en innovaciones menores que participan de la naturaleza del cambio técnico localizado. Cuando las firmas encaran actividades innovativas, usualmente tienen su propia "frontera tecnológica" 4/. Esta viene fuertemente influida por las condiciones iniciales de diseño de la tecnología que utilizan corrientemente. Las firmas no exploran a todo lo largo de la superficie de posibilidades de producción, sino sólo lo relativo a aquellos puntos que les son más directamente relevantes, generando por tanto "innovaciones localizadas"; esto es, que afectan sólo procesos particulares (Atkinson y Stiglitz, *op. cit.*). Estas innovaciones son altamente apropiables e implican cambios en la forma de la superficie de producción, antes bien que traslaciones de la misma. Se trata, entonces, de una búsqueda permanente hacia un equilibrio inobtenible en el contexto de un proceso heurístico de exploración donde raramente se dispone de algoritmos precisos. Es por tanto necesario recurrir a reglas intuitivas y objetivos aproximados (Nelson y Winter, *op. cit.*). Al mismo tiempo, para emplear los términos de Rosemberg, existen ciertas "secuencias compulsivas" a nivel microeconómico: las firmas tendrán un sesgo en la orientación del proceso de búsqueda en la dirección de las soluciones más compulsivas y obvias a los problemas de adaptación tecnológica. Esta orienta-

---

4/ Hay que distinguir entre una 'frontera científica' (o científico-tecnológica) y una económica. La primera se define por aquella situación en la que los retornos a los gastos en investigación se igualan a cero. Sin embargo, ello puede requerir un volumen finito o infinito de tales gastos. En contraste, la frontera económica en lo que a posibilidades innovativas se refiere viene dada por aquel punto en que se igualan los beneficios y costos marginales de la investigación. (Ver, Binswagner, H.P. (1974)).

ción puede ser escasamente sensible ante un rango considerable de variaciones en las variables macroeconómicas. La consideración de estas circunstancias conduce a la formulación de un enfoque de la microeconomía del cambio técnico en términos del análisis de ruptura de cuellos de botella. De este modo, no se desecha la consideración de los problemas cotidianos que suscita la tecnología existente.

El flujo de actividad inventiva doméstica que consiste principalmente en esfuerzos adaptativos ha sido ya investigada con referencia a varios países en desarrollo (Katz, J., op.cit., Almeida F., Guimaraes, E. y Fighereido M.M., (1971)) y Wionczek, M. y Navarrete, J., (1975). Estos estudios inauguraron un creciente interés por la problemática del aprendizaje tecnológico y su rol en el proceso de cambio técnico en los países en desarrollo.

Es innecesario destacar que el marco analítico relevante de estos estudios está inmerso también en un proceso adaptativo de aprendizaje por cuanto, si bien en especial en los países en desarrollo más avanzados, la generación de innovaciones menores a través de esfuerzos no rutinarios de ingeniería de planta han devenido en algo normal, el proceso de aprendizaje mismo está usualmente referido a tecnologías y diseños de ingeniería originados en el exterior. Esto implica que, como se verá más abajo, las ya mencionadas secuencias del proceso de búsqueda vienen en gran medida condicionadas por criterios de diseño de procesos definidos exógenamente. Es a partir de esta constatación que incorporamos nuestras observaciones al desarrollo de la teoría del cambio técnico endógeno que queda referido.

Si se observa al curso de la curva de aprendizaje experimentalmente identificada durante un período suficientemente largo, se podrá notar que ella tiende a alcanzar un plateau o estado estacionario (ver, por ejemplo, Baloff, N., op. cit.). La presencia de este aplanamiento de la curva revela la existencia de un fenómeno de saturación. ¿Saturación de qué? Ciertamente no de la capacidad de adquirir nuevos conocimientos por parte de los cuadros técnicos. Puede afirmarse que lo que se satura es el potencial adaptativo del proceso. Es por tanto posible definir el proceso de aprendizaje como uno de progresiva explotación del potencial adaptativo de un proceso.

Corresponde entonces preguntarse cuál es la naturaleza de ese potencial adaptativo. ¿Viene dada por parámetros puramente técnicos que se sustraen de toda posibilidad de control? O, por el contrario, ¿es posible ejercer influencia sobre él, de modo de tratarlo como un parámetro de decisión?. En la medida que el potencial adaptativo de un proceso se define esencialmente en la fase de diseño, estas cuestiones que quedan aquí introductoriamente planteadas constituyen la médula misma de la presente investigación.

## I.2. El enfoque adoptado

El estudio gira en torno de las relaciones entre el aprendizaje de ingeniería de diseño y el de ingeniería de planta. 5/

---

5/ En su acepción más amplia, la capacidad de ingeniería de diseño es aquella que permite llegar, a partir de conocimientos a escala de laboratorio o planta pilo-

Una primera pregunta que surge, de carácter general, es: ¿cómo condiciona uno al otro? Más específicamente, ¿de qué manera la performance técnica (fruto de la actividad de ingeniería) de planta es influida por la calidad de la ingeniería de diseño de esa planta? Y, recíprocamente, ¿de qué manera la performance técnica de una generación dada de plantas influye en la calidad de la ingeniería de diseño de sucesivas generaciones de planta?

Una segunda pregunta concierne a la problemática específica que los países de América Latina presentan al respecto: ¿cuál es el potencial de desarrollo de una capacidad local, organizada e independiente de ingeniería de diseño de procesos a partir de las actuales condiciones? Estas condiciones vienen definidas por el origen importado de lo sustancial de los servicios de ingeniería de diseño de procesos, y por crecientes -en algunos países como Argentina, Brasil y México, significativos- esfuerzos de ingeniería de planta.

La búsqueda de respuestas a la primera pregunta -y su recíproca- brindará el marco para la dilucidación de la segunda.

Las respuestas que se presentan en éste documento revisten un carácter esencialmente exploratorio. Están basadas en evidencia extraída a partir del estudio de la experiencia de contratación, diseño e ingeniería de planta de un grupo de firmas químicas y petroquímicas argentinas 6/. Dado que se trata de una primera exploración en el tema, el criterio para recoger la información fue necesariamente amplio: se basó primordialmente en extensas entrevistas con ingenieros de procesos que trabajan en las plantas y en firmas de ingeniería 7/. También se recurrió a información documental relativa a esa experiencia, así como a la literatura técnica.

En el esfuerzo por dar respuesta al tipo de preguntas que nos formulamos es notoria una circunstancia desfavorable. Se trata de que, si bien las relaciones entre condiciones iniciales, por un lado, y operativas, por el otro, es normalmente tenida en cuenta desde el ángulo de los rendimientos económicos de la planta (vgr. relación inversa entre costo de inversión y costos operativos), no ocurre algo análogo respecto de las relaciones técnicas entre ambos; esto es, entre condiciones iniciales de diseño y rendimiento técnico de planta. Nos hemos encontrado con una notable escasez de información y elaboración al respecto, excepto desde enfoques parciales (por ejemplo, la influencia del diseño sobre

---

to, a diseños comerciales adecuados a las necesidades de un emplazamiento específico. La actividad de ingeniería de diseño produce los insumos técnicos necesarios para erigir y poner en marcha la planta, a partir de conocimientos de proceso disponibles. La capacidad de ingeniería de planta es aquella que, a partir de las condiciones de diseño y operación de una planta dada, permite ir mejorando su performance técnica a través del tiempo, adecuándola a una mas rentable performance económica. La actividad de ingeniería de planta incluye esfuerzos técnicos no rutinarios tales como resolución de problemas y ruptura de cuellos de botella que permiten superar las condiciones iniciales de diseño (por más detalles, ver capítulo III).

6/ Las firmas son: Atanor SAM, Petroquímica General Mosconi, Petrosur, PASA, Compañía Química, Ducilo, Duranor, Electroclor e Ipako.

7/ Techint y Mc Kee Argentina.

la puesta en marcha), o bien, para casos límite (fallas operativas mayores y siniestros debidos a diseños o ejecuciones de proyecto defectuosas) 8/.

En América Latina la preocupación por el tema del desarrollo de la capacidad organizada de ingeniería no es nueva, aunque el énfasis usual ha sido bien distinto. La forma en que se lo ha encarado puso habitualmente el énfasis respecto de las relaciones entre condiciones de contratación y desarrollo de la ingeniería de proyectos. Así, se ha realizado un considerable número de estudios sobre 'desagregación del paquete tecnológico' y mecanismos indirectos de transferencia de tecnología. A través de ellos, y de la ejecución práctica de criterios desagregativos en la realización de proyectos específicos, se ha logrado aumentar su contenido local y, en alguna medida, sentar bases para estimular aumentos futuros de ese contenido.

Sin embargo, si bien se logró de esa manera promover el desarrollo de la capacidad local de ingeniería de proyectos así como de equipamiento -lo cual también fue fruto de un natural proceso evolutivo y de circunstancias económicas que lo favorecieron-, esto ha influido poco sobre el desarrollo de una capacidad organizada de ingeniería de procesos.

En realidad, el desarrollo de la capacidad de ingeniería de detalle presenta una problemática bien distinta de la que concierne al desarrollo de la capacidad de ingeniería de diseño de procesos. La experiencia muestra que es ingenuo aspirar a alcanzar el segundo como resultado de la mera acumulación de capacidad de ingeniería de detalle, sin perjuicio de que ésta pueda jugar un papel coadyuvante. Prácticamente ninguna de las firmas independientes de ingeniería tanto en Argentina como en otros países de América Latina realizan ingeniería de procesos en medida significativa, a pesar de que han desarrollado sustancial capacidad de ingeniería de detalle a lo largo de lustros de experiencia. Los representantes de esas firmas aluden a la escasa rentabilidad de la ingeniería de procesos 9/.

Puede observarse que, dependiendo de la dimensión del mercado interno, de la disponibilidad de personal profesional y técnico y del nivel relativo de sus remuneraciones, es posible en América Latina, por medio de negociación, promoción y gradual acumulación de experiencia, desarrollar una amplia capacidad organizada de ingeniería de detalle. Esto ha ocurrido más notoriamente en Argentina, Brasil y México, donde este tipo de actividad mas bien repetitiva y rutinaria es privadamente rentable, sin lugar a dudas, bajo las actuales condiciones (en especial,

---

8/ Ver, por ejemplo, Clark, M.E., De Forest, E.M. y Steckley, L.R., (1971); y Ducommun, J.C., (1966). En lo que respecta al concepto de 'puesta en marcha' es preciso distinguir entre dos acepciones. Una es la que lo refiere al período a cuyo término se alcanzan las condiciones planeadas de operación. Otra se remite a la mejor performance técnica que llegue a desplegar la planta. En nuestro uso del concepto nos atendremos a la primera acepción.

9/ Cfr., por ejemplo, ponencia del representante de A. Mc Kee Argentina ante el Primer Simposio de Equipos y Servicios para Industrias de Proceso, Buenos Aires, 1975. Vale aquí aclarar que lo anterior no implica que no haya habido instancias de exitosas operaciones de prestación de servicios de ingeniería de diseño entre países latinoamericanos. Pero se trata de ejemplos aun puntuales donde usualmente el proveedor es también usuario del proceso cuyo diseño y licencia comercializa; no se trata, por tanto, de una actividad netamente diferenciada.

si quienes la realizan, se dedican también a la construcción civil, como de hecho en general ocurre).

Por otra parte, si bien se ha desarrollado capacidad de ingeniería de procesos, fuera del ámbito específico de las firmas de proceso esa capacidad se encuentra sumamente dispersa y desorganizada. Como actividad importante de una firma de ingeniería local no presenta perspectivas comerciales atractivas. No existen, por tanto, condiciones como para competir con la oferta importada de servicios de ingeniería de diseño de procesos. La escasa rentabilidad que es percibida por las firmas locales respecto de esta línea de actividad y, consiguientemente, el poco atractivo empresarial que los suscita, puede explicarse de manera análoga a lo relativo a la generación de nuevo conocimiento básico: la presencia de fuertes incertidumbres, limitada apropiabilidad, largos períodos de maduración, y la necesidad de un mercado suficientemente grande y homogéneo con relativa libertad de entrada.

Es que, salvo algunas diferencias, se trata del mismo problema. ¿En qué residen estas diferencias? Es sabido que no se puede aspirar a desarrollar el potencial de ingeniería de diseño de procesos a través de elencos técnica, organizativa y comercialmente independientes, si no se desarrolla también la actividad innovativa local. Esto obedece a razones de mercado y a motivos específicamente técnicos.

Por un lado, las empresas que disponen del control de los conocimientos de proceso muestran un grado bastante apreciable de discrecionalidad en la selección o aceptación del grupo de ingeniería que le habrá de llevar los datos de laboratorio o de planta piloto a escala de planta comercial 10/.

Por el otro, existe una clara necesidad de continuidad y de complementación entre ambos estadios del desarrollo de un proceso: es difícil pensar que la ingeniería de diseño se realice de manera desvinculada de la fuente que genera los conocimientos de proceso que le sirvan de base para ese diseño.

Hay, empero, distintas maneras con que puede visualizarse esta relación entre capacidad innovativa y capacidad de diseño. Estas diferencias obedecen a la existencia de distintos conceptos respecto de lo que se entienda por "actividad innovativa".

Hay una línea de pensamiento, siguiendo a Schumpeter, por la cual la actividad innovativa implica innovación en la frontera, innovación mayor. Si adoptamos este criterio, la posición latinoamericana en cuanto a la posibilidad de desarrollar ingeniería de diseño de procesos sería más bien desesperanzada, por cuanto, en el mejor de los casos, estaría relegada a un futuro más bien distante.

Pero hay un criterio alternativo con el cual definir qué es "actividad innovativa". Se trata, según este criterio alternativo, de toda actividad orientada hacia -y por la cual se obtiene- nuevo conocimiento no trivial relativo a procesos y productos, independientemente de que sea nuevo a nivel universal o de planta. Básicamente, es lo que se denomina innovación menor o incremental.

---

10/ Ver, este respecto: Sercovich, F.C., (1977) .

La literatura abunda en ejemplos que muestran que es de este tipo de innovación del cual se han extraído resultados económicos más provechosos en términos de ganancias en productividad. 11/

Se ha mostrado que en Argentina, aunque no hay mucha innovación mayor, se consagra una sustancial masa de esfuerzo a la generación de innovaciones menores. (Katz, J., op.cit.). Esto indica que en este tipo de innovación disponemos de una ventaja relativa. Y que el desarrollo de capacidades de diseño de procesos puede por tanto estar asociada en nuestro caso no con actividad innovativa mayor, sino menor; esto es, el tipo de actividad que, por vía de mejoras progresivas de procesos, insumos y productos conocidos, mejoras fundamentalmente de tipo adaptativo, de lugar a subsecuentes esfuerzos de ingeniería de diseño que lleven esa sustancial masa de conocimiento mejorativo acumulado desarrollado en planta a bases ingenieriles estandar y transmisibles. 12/

Este tipo de actividad innovativa tiene lugar básicamente a nivel -y es realizada por los planteles de ingeniería- de planta. El conocimiento desarrollado por esos elencos y su misma experiencia acumulada pueden constituir la base para la organización y desarrollo de capacidades de ingeniería de diseño de procesos 13/. Conocemos algunos ejemplos donde así ha ocurrido 14/.

Ahora bien; si se admite que la orientación y el rendimiento de los esfuerzos de ingeniería de planta no es independiente de la calidad de la ingeniería de diseño de esa planta; entonces puede visualizarse cómo los criterios aplicados en el diseño de procesos afectan el futuro desarrollo de la capacidad local de ingeniería por vía de su influencia sobre la ingeniería de planta, mediante cuyos esfuerzos se habrán de explotar las economías latentes de escala implícitas en el potencial adaptativo conferido al proceso durante la fase de diseño. A su vez, interesará examinar la fuente y naturaleza de la influencia que distintas variables tienen sobre la definición de los criterios de diseño y, por su intermedio, sobre las condiciones iniciales de diseño que configuran el punto de partida de los esfuerzos creativos de ingeniería de planta.

---

11/ Véanse, por ejemplo, las referencias dadas en la nota 1/.

12/ Puede aquí efectuarse una advertencia respecto de la posibilidad de que el aprendizaje de ingeniería, en lugar de conducir a adaptar la tecnología a las condiciones locales, implique la adaptación de los conocimientos y uso de recursos a las condiciones de la tecnología. Esto constituye un caso no infrecuente de 'adaptación perversa'.

13/ Cabe aquí recordar que: "La labor de la ingeniería [de diseño] de procesos no cesa con la finalización del diseño, la entrega de la ingeniería básica y la puesta en marcha. Tras ello, los ingenieros de proceso destinados al departamento de operación ... realizan un programa de ajuste del proceso para asegurar las mejores condiciones de operación. Tales ajustes implican normalmente el rediseño de partes del mismo para mejorar la calidad y la cantidad de la producción. Por tanto, muchas de las estrategias de la ingeniería de procesos son aplicables tanto en producción como en diseño". Rudd, D.F. y Watson, Ch. C.; (1968).

14/ Uno de ellos es el de Tecnor en la Argentina.

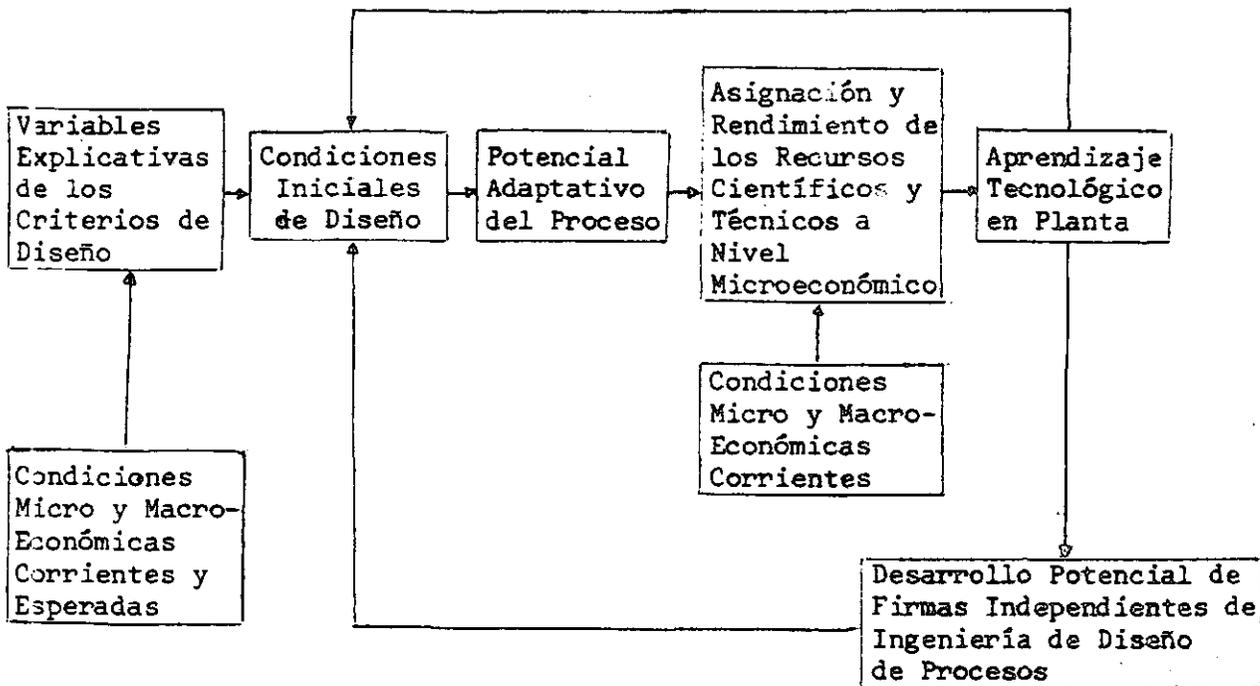
Surgen así tres preguntas que suministran la guía para el conjunto de la investigación. Ellas son:

(i) ¿Cómo afectan las condiciones iniciales de diseño la performance técnica de una planta (y así, la asignación y rendimiento de los esfuerzos de ingeniería de planta)?

(ii). ¿Cuáles son las variables que explican la definición de las condiciones iniciales de diseño?

(iii) ¿De qué manera extraer máximo provecho del aprendizaje tecnológico acumulado a partir de la experiencia de pre-inversión y operación de plantas con objeto de desarrollar firmas locales independientes de ingeniería de diseño de procesos y, a través de ellas, adaptar las condiciones iniciales de diseño a las necesidades locales?

Estas preguntas centrales emanan directamente del enfoque general que queda expuesto más arriba, el cual puede ser representado por una secuencia del siguiente tipo:



El desarrollo potencial de firmas locales independientes de ingeniería de diseño de procesos depende del aprendizaje tecnológico previamente acumulado. Este, en turno, está asociado con la asignación y rendimiento de los recursos científicos y técnicos a nivel microeconómico. Tal asignación y rendimientos dependen de las condiciones económicas corrientes y del potencial adaptativo de los procesos industriales, el cual en gran medida resulta de las condiciones iniciales de diseño definidas con arreglo a los criterios de diseño utilizados. Luego de sucesivas generaciones de planta, el aprendizaje tecnológico a nivel de planta y la subsecuente pericia adquirida en relación a ingeniería de diseño, permiten ejercer influencia sobre las condiciones iniciales de diseño.

Los criterios de diseño que se encuentran fuertemente influidos por las condiciones económicas corrientes y esperadas en el país de asentamiento de la firma de ingeniería de proceso pueden guiar la búsqueda de soluciones con mayor o menor potencial de mejora a través del tiempo. Así, por ejemplo, cuanto más flexible sea un proceso respecto de los rangos de calidad de materia prima que requiera, mayor será la posibilidad de adecuarlo a la calidad específica de las materias primas disponibles localmente. Desde luego, existe una relación positiva entre el potencial adaptativo que se desee conferirle a un proceso y el costo de inversión correspondiente. Se trata, por tanto, de una elección de carácter netamente económico en un contexto de incertidumbre respecto, entre otras cosas, del curso futuro del estado del conocimiento. El carácter y papel de estas incertidumbres constituyen una de las cuestiones fundamentales a ser abordadas.

De las opciones alternativas respecto del potencial adaptativo a serle conferido a un proceso puede depender la estructura de los esfuerzos de ingeniería de planta para mejorar el proceso, así como la magnitud de esos esfuerzos y su productividad. Ello, a su turno, influirá sobre las características del aprendizaje acumulado; esto es, el tipo de conocimientos sobre los cuales se ha experimentado más y donde se habrán de desarrollar mayores ventajas relativas. Finalmente, las características del aprendizaje acumulado definirán también los sesgos o énfasis relativos en la capacidad de diseño de procesos que pueda llegar a organizarse, especializarse e integrarse en procura de un desarrollo propio independiente de empresas de ingeniería de diseño de procesos. Este ciclo se amplía a medida que se inicia un proceso de aprendizaje específico en diseño de plantas por estas firmas que habrá de realimentarse con el de los planteles de ingeniería de planta.



## II. EL PROBLEMA A LA LUZ DE DOS CASOS CONTRASTANTES

Cuando se considera la performance técnica de una muestra aleatoria de plantas industriales luego de determinado tiempo de su puesta en marcha, pueden surgir ciertas perplejidades para cuya explicación el auxilio de la teoría económica remite a un mayor número de preguntas que de respuestas.

Considérense dos casos simples.

(i) A los cinco años de la puesta en marcha, y en ausencia de inversiones significativas en activo fijo adicional, se llega a operar sustancialmente por encima de la capacidad contratada 1/.

(ii) Diez años después de la puesta en marcha, y habiéndose realizado adiciones significativas de activo fijo, apenas si se ha podido llegar a alcanzar la capacidad contratada.

Surgen así sendas preguntas para las dos situaciones consideradas.

(a) ¿Qué explica que, en ausencia de inversiones significativas, la planta haya tenido suficiente flexibilidad como para que se haya podido superar sustancialmente la capacidad contratada (caso i)?

(b) ¿Qué explica que, a pesar de haberse realizado adiciones significativas de equipo, la planta haya sido tan inflexible como para permitir apenas alcanzar su capacidad contratada recién tras un decenio de operación (caso ii)?

Antes de dilucidar estas cuestiones, procedamos a examinar ambos casos con mayor detalle. En este examen se aludirá tan solo a los elementos esenciales del problema. Por referencia más completa, ver los apéndices A y B.

### II.1. Un caso de flexibilidad

Se trata de una empresa estatal que contrató la licencia, ingeniería básica, ingeniería de detalle, construcción, montaje y puesta en marcha de un complejo para la producción de aromáticos. La contratación se subdividió entre conocimientos de proceso e ingeniería básica, por un lado, y el resto de las prestaciones por el otro. Para ello se realizaron sendos llamados a concurso. La capacidad contratada ascendió a 206.000 toneladas año.

En el llamado a licitación de procesos e ingeniería básica la empresa definió taxativamente los requisitos técnico-económicos a ser satisfechos por las propuestas (distribución de productos requeridos, índices de precios unitarios a ser empleados en los cálculos, especificaciones de insumos y productos, requisitos para la integración entre las plantas del complejo, etc.).

---

1/ Capacidad contratada es aquella que la firma de ingeniería se compromete a dotar a la planta.

Sobre la base de esos requisitos, la firma extranjera cuya propuesta fue aceptada, elaboró el paquete de ingeniería básica, donde se definieron las condiciones iniciales de diseño (características de las cargas, especificaciones mínimas de los productos, capacidades de diseño de las distintas plantas del complejo, rendimiento del proceso, rendimiento y vida útil de los catalizadores, especificaciones de los equipos y materiales principales, etc.).

Con el beneficio de un examen retrospectivo pueden identificarse las siguientes características de las condiciones iniciales de diseño:

En el cálculo de los rendimientos se consideró un corte de crudo menos rico en aromáticos que el que de hecho se dispuso.

Se subestimó el fondo necesario como provisión para la adquisición de repuestos.

Se economizó excesivamente en materia de equipos auxiliares.

El complejo adoleció de algunos desbalances interoperativos o interplantas.

Se subestimó el nivel de temperatura que podían admitir los catalizadores.

Se sobreestimaron los márgenes de seguridad operativa necesarios así como los relativos a algunos equipos.

Se optó por una solución fácilmente sustituible por otra más conveniente en la sección de cristalización.

Estas características del diseño inicial, (salvo la segunda y la tercera), en el contexto de un mercado en expansión, con disponibilidad de insumos a precios ventajosos, favorecieron el resultado exitoso de los esfuerzos de ingeniería de planta emprendidos con objeto de ir aumentando la capacidad del complejo a través del tiempo. Como queda dicho, para ello no fue necesario incurrir en inversiones significativas en activo fijo: bastó con actividades técnicas tales como resolución de problemas y ruptura de cuellos de botella por el plantel técnico de planta para que, al cabo de cinco años de operación se esté en condiciones de superar en un 25 por ciento la capacidad contratada. Cabe destacar que, si bien el resultado último de los esfuerzos de ingeniería de planta puede sintetizarse, por tanto, como orientado a la expansión de la capacidad, de hecho también implicó reducciones en consumos específicos, en costos de mantenimiento, y en los consumos unitarios de energía. En otros términos, los aumentos de capacidad fueron acompañados por reducciones en los costos unitarios de producción.

Desde el punto de vista del uso de recursos, estas innovaciones menores no desplazaron mano de obra. Esto obedece a que, por diseño, la planta fue dotada de un mínimo de personal necesario para este tipo de inversiones consistentes en procesos continuos y altamente automatizados. En cambio, sin duda, implicaron un mayor rendimiento de la mano de obra y un abaratamiento del capital invertido por unidad de capacidad.

## II.2. Un caso de inflexibilidad

Este caso concierne a un complejo para la producción de fertilizantes nitrogenados y mezclas. La titularidad del capital está compartida por capitales locales y extranjeros asociados. Tanto el estudio de factibilidad como la provisión del proceso quedó a cargo de un grupo que realizó ambos tipos de actividades, basado en el país de origen de los aportantes extranjeros de capital. El diseño y realización del proyecto se encomendó a una firma de ingeniería de un tercer país sobre bases llave en mano.

Excepto en lo que se refiere a la capacidad deseada y contratada (56.000 y 54.000 tons./año de amoníaco y de urea, respectivamente), poco es lo que influyó el grupo inversor respecto de las definiciones de diseño del proyecto (capacidad y rendimiento del proceso, empleo de compresores recíprocos y especificación de otros equipos principales, calidad de los catalizadores, equilibrios termodinámicos, interdependencia operativa, etc.).

Las condiciones iniciales de diseño evidenciaron los siguientes sesgos:

(i) En la planta de urea:

la provisión de equipos auxiliares y de stocks requeridos de repuestos resultó deficiente;

se sobreestimó el factor de servicio de los equipos (compresores y reactor);

se subestimó la necesidad de suministro de anhídrido carbónico y de amoníaco;

(ii) En la planta de amoníaco:

se sobreestimó el factor de servicio de compresores, reformador y de absorción de anhídrido carbónico;

se sobreestimó la velocidad normal de los motores;

se subestimó la provisión de equipos auxiliares y de stocks necesarios de repuestos;

se subestimaron los problemas de corrosión.

Estas condiciones del diseño condujeron a la necesidad de sostenidos esfuerzos de ingeniería de planta destinados a atacar el bajo rendimiento resultante con el objeto de aumentar los volúmenes ofrecidos al mercado. Esta necesidad resultaba tanto más perentoria cuanto que la firma ocupa una posición monopólica en el mercado local, con una demanda en crecimiento. De tal modo, se introdujeron una serie de modificaciones y mejoras al complejo -detalladas en el apéndice- que permitieron lentamente ir neutralizando las limitaciones técnicas de diseño.

Pero no bastó con ello. Fue preciso también efectuar inversiones significativas en activo fijo adicional bajo la forma de un tercer motocompresor de anhídrido carbónico, una tercera bomba de amoníaco y una tercera bomba de carbamate

que duplicaron las capacidades unitarias de los equipos originales previstos por el diseño. Sólo merced a estas inversiones adicionales y al resultado de los esfuerzos de ingeniería de planta acumulados, fue posible aproximarse a la capacidad contratada tras diez años de operación. Tales inversiones involucraron una relación capital/trabajo y capital/producto más elevada que la originalmente prevista. Es claro que el rendimiento de los esfuerzos de ingeniería de planta resultó mucho menor, en este caso, que en el anterior.

Con el beneficio de esta información podemos volver ahora a las preguntas formuladas al comienzo de este capítulo respecto de las causas subyacentes de patrones tan disímiles de performance técnica.

### II.3. Una evaluación comparativa

Una primera explicación posible de la dispar performance técnica observada comparando ambos casos se refiere al curso efectivo de la demanda. Su nivel podría haber estimulado que se operase a una tasa más elevada que la contratada (caso i). Pero, si se descarta que se le haya exigido a la planta más de lo que ésta podía dar bajo condiciones normales y sostenidas de operación -de lo contrario esa exigencia revertiría, en el mejor de los casos, en muy elevados costos de reparación, reposición y mantenimiento-, es claro que la razón de esa respuesta flexible ante una demanda que actuó como estímulo debe buscarse en otra parte.

En el caso ii el curso de la demanda hubiese podido ser tal que originase un largo período de operación a capacidad ociosa. Pero esta posibilidad queda descartada, entre otras cosas, por cuanto de haber sido así no se hubiesen realizado importantes adiciones de activo fijo (que tan sólo permitieron alcanzar, no superar, la capacidad contratada).

Una segunda explicación factible podría referirse a las condiciones de suministro de materias primas y otros insumos críticos (energía, por ejemplo). En términos de calidad, su subestimación (sobrestimación) puede haber dado lugar a mayores (menores) rendimientos a los esperados. Es obvio que éste resultado no puede adjudicarse a la calidad de la materia prima per se, sino a las hipótesis que, al respecto, sirvieron de base al cálculo de diseño del proceso (obedeciendo a genuinas incertidumbres, vgr. sobre la calidad media de un yacimiento; a mala información o a falta de interés en utilizar la información correcta). 2/

Deficientes suministros en cuanto a cantidad de materia prima bien podrían justificar la pobre performance de una planta. Empero, es difícil pensar en

---

2/ La calidad de la información utilizada estará influida por su costo. La decisión última al respecto, debe recaer sobre la firma propietaria del proyecto por cuanto es ella quien debe evaluar la ecuación costo-beneficio de acceder a la mejor información disponible. La adquisición de una 'planta de carpeta', que minimiza el costo de acceder a información, difícilmente puede justificarse como una decisión racional exclusivamente desde el punto de vista de esa ecuación.

irregularidades que hagan sentir sus efectos durante una larga década. De hecho, no ocurrió así en los casos examinados (las irregularidades, que las hubo en ambos, tanto en lo que respecta a materias primas, como a energía y conflictos laborales, fueron pasajeras).

Una tercera alternativa nos remite a la capacidad técnica del plantel operativo y de ingeniería de planta vis a vis la flexibilidad de la planta. Podría pensarse que, en el caso i , la calidad de los cuadros técnicos fue excelente, en tanto que, en el caso ii , careció de las aptitudes necesarias como para poder operar eficazmente la planta.

Es claro que, por excelentes que sean los cuadros técnicos, estos no podrán extraer de la planta más de lo que ella puede dar con arreglo a los mejores estándares ingenieriles. Debe haber, por tanto, ciertas condiciones intrínsecas a la planta (y al proceso que ella incorpora) que permitan que los esfuerzos del plantel ingenieril que la tiene a su cargo fructifiquen y se traduzcan en la superación de las condiciones contratadas de diseño. Por su parte, en el caso ii , si bien hubo la necesidad de efectuar un aprendizaje técnico antes y durante un período inicial posterior a la puesta en marcha -lo cual también fue preciso en el caso i -, la variedad y calidad de las mejoras introducidas por el elenco técnico durante esos diez años de operación atestiguan que la limitación no residió en la capacidad de ese elenco.

En resumen: descontada la influencia de la demanda, de irregularidades en el suministro de materias primas y otros insumos esenciales y de diferencias acentuadas en la aptitud del elenco técnico, la dispar performance técnica de las plantas respecto de lo contratado nos remite a la naturaleza de las condiciones iniciales de diseño. Es preciso pues mostrar de qué manera esas condiciones constriñen o facilitan la performance técnica de una planta durante el curso de su vida operativa. En otros términos, es preciso evaluar las condiciones iniciales de diseño, vis a vis los esfuerzos de ingeniería de planta, si es que deseamos ahondar en cuanto a los determinantes de esa performance.

Del estudio de los dos casos presentados se desprende claramente la naturaleza de esa influencia. En el caso i , la subestimación de la calidad de la materia prima en los cálculos del rendimiento del proceso, así como del rendimiento de los catalizadores, unido a economías latentes de escala implícitas en los desequilibrios interoperativos y otros factores aludidos más arriba originaron condiciones propicias para fructuosos esfuerzos de ingeniería de planta. Durante el transcurso del tiempo, el plantel de ingeniería de planta fue identificando -y extrayendo ventaja de- uno a uno estos factores, expresándose ello en una clara superación de las condiciones iniciales de diseño.

En el caso ii , los cuadros técnicos también fueron identificando durante el transcurso del tiempo ciertos sesgos en el diseño, aunque estos tuvieron un signo contrario al del caso i ; esto es, implicaron condiciones tales como sobreestimación del factor de servicio de los equipos, que implicaron bajos rendimientos de los esfuerzos de ingeniería de planta en términos del curso de la performance técnica del complejo. El grueso de esos esfuerzos hubo de ser dirigido a contrarrestar la influencia de las limitaciones impuestas por el diseño original, con el apoyo de importantes inversiones fijas no previstas.

El tipo de desviaciones respecto de la capacidad contratada que queda ilustrado, de ninguna manera constituye un hecho singular o anómalo. Como se con-

firmará a partir de evidencia consignada en el capítulo VI , lo inusual es que esas desviaciones no se verifiquen, o que ocurran de manera totalmente planeada. Para que así ocurra, como se verá, sería preciso una completa ausencia de incertidumbre y un conocimiento perfecto respecto del avance futuro del conocimiento.

#### II.4. Hacia un marco interpretativo. Implicaciones para la investigación.

El tipo de preguntas planteadas y de respuestas sugeridas abren un abanico de cuestiones relativas a la naturaleza del cambio técnico y, más particularmente, del proceso de aprendizaje de ingeniería de planta y de diseño.

Una primera cuestión concierne a las causas que originan sesgos hacia una mayor o menor flexibilidad o potencial adaptativo de un proceso. Una vez identificada la existencia de esos sesgos, resulta ahora necesario explicar por qué ellos existen. Esta cuestión será abordada en el capítulo IV , una vez realizada una conceptualización previa del fenómeno en el capítulo III .

Seguidamente, se plantea la necesidad de examinarlo más detenidamente en relación al tópico de las economías de escala, por cuanto si bien éste último ha recibido considerable tratamiento en la literatura, ello no ha contribuido a esclarecer el tipo de problema que estamos investigando.

En tercer lugar, estamos introduciendo una nueva variable -las condiciones iniciales de diseño-, que es preciso vincular claramente con el curso de la trayectoria innovativa y del proceso de aprendizaje tecnológico, como elemento esencial de la teoría del cambio técnico endógeno. Tal el cometido del capítulo VI .

### III. CAPACIDAD EFECTIVA Y CAPACIDAD NOMINAL; SOBREDISEÑO Y SUBDISEÑO: DILUCIDACION DE CONCEPTOS

#### III.1. Capacidad nominal y capacidad efectiva

Como puede desprenderse de la discusión precedente, la performance técnica de una planta no ha quedado referida ni a la capacidad contratada (a ser denominada indistintamente capacidad nominal o de diseño), ni al curso de la producción de la planta. Será entendida en términos de un tercer concepto: el de capacidad efectiva. Dada la importancia que reviste este concepto a los efectos del análisis que sigue, y su poco frecuente uso en la literatura, procedemos a especificar su contenido.

La capacidad nominal es aquella para la cual se contrató la planta. El volumen de producción está definido por las cantidades producidas por unidad de tiempo, vgr. un año. Cuando se dice que una planta opera al 50 por ciento de su capacidad se está haciendo referencia a la relación entre volumen de producción y capacidad nominal.

La capacidad efectiva, por su parte, se define en términos del volumen de producción que la planta puede alcanzar en el corto plazo de manera sostenida bajo condiciones normales de operación y de suministro de todo tipo de insumos -físicos, laborales, financieros-, admitiendo el aporte de todos aquellos esfuerzos de ingeniería de planta que hayan llegado a rendir fruto hasta el momento del cálculo. No se incluyen en el concepto los cambios de capacidad que obedezcan a inversiones significativas en activo fijo adicional posteriores a la puesta en marcha. Sí se incluyen, en cambio, aquellas inversiones complementarias de escasa envergadura que acompañan a los esfuerzos de ingeniería de planta 1/.

La capacidad efectiva se refiere, por tanto, al volumen de producción que la planta puede potencialmente alcanzar en el corto plazo, bajo las condiciones especificadas.

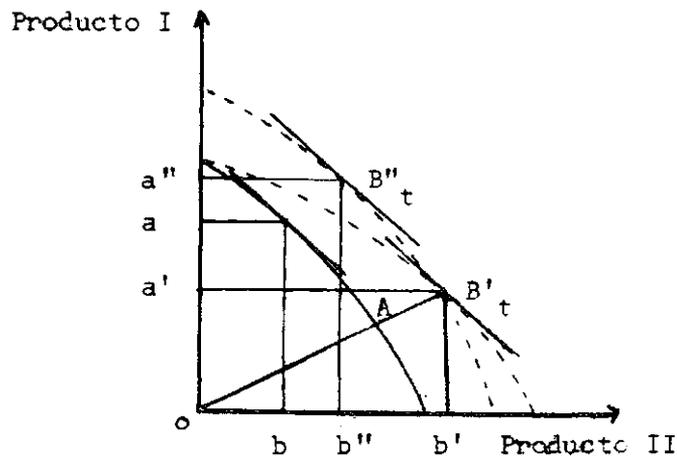
Obsérvese que alteraciones en la demanda o en las condiciones de suministro de insumos pueden significar distintas cosas según se las visualice desde el ángulo de la relación entre producción y capacidad nominal, por un lado, o desde el de la relación entre producción y capacidad efectiva, por el otro.

---

1/ Estas cualificaciones serán consideradas en más detalle a lo largo del documento. Cabe, por el momento, hacer la siguiente aclaración. Si bien el argumento se habrá de presentar en términos de una planta monoproducción, no hay dificultades analíticas para incorporar el caso de plantas multiproducción, cuyos cambios de capacidad efectiva a través del tiempo involucre cambios en la mezcla de productos. El conjunto de mezclas de productos posibles en un determinado momento puede ser expresado bajo la forma de una curva de posibilidades de producción acorde con el enfoque de los modelos de programación (ver Eilón, S.; Gold, B. y Soesan, J. (1976), pp.125-126). Para el caso de dos productos, suponiendo continuidad, obtendríamos el siguiente gráfico:

Veamos algunos ejemplos.

(i) El suministro de insumos químicos de especificación distinta a la requerida por diseño puede dar lugar a problemas de corrosión no anticipados. Inicialmente, el nivel de producción puede no verse afectado. Pero, a medida que esos problemas de corrosión se agudicen, puede surgir la necesidad de efectuar mayores paradas que las previstas por diseño. El nivel de producción se verá consecuentemente afectado. Si se mantienen todas las demás condiciones inalteradas (a partir de una equivalencia entre capacidad nominal y efectiva), la capacidad efectiva se habrá reducido por debajo de la nominal. Esto implica que, el haber mantenido por un tiempo incambiado el nivel de producción, si bien no afectó el coeficiente de utilización de la capacidad nominal, sí condujo a un aumento -excesivo- del nivel de utilización de la capacidad efectiva (por cuanto ésta se redujo). Ese nivel de producción no hubiese podido mantenerse por mucho tiempo sin causar grandes dificultades a la planta. En una



La curva completa exhibe las posibilidades de producción contempladas por diseño (capacidad nominal). La curva segmentada paralela a la anterior muestra las posibilidades de producción correspondientes a la capacidad efectiva alcanzada en el momento  $t$ . Esta curva implica que la superación de la capacidad nominal ha sido neutra desde el punto de vista de las distintas mezclas de productos que puedan obtenerse. Así,  $b''/a'' = b/a$ . La curva segmentada no paralela a la curva completa revela las posibilidades de producción correspondientes a una capacidad efectiva alternativa que se alcanza en el momento  $t$ , con un tipo de cambio técnico no neutro respecto de la mezcla de productos (el producto II se ha abaratado en relación al producto I para todas las posibilidades que se contemplen). La superación de la capacidad nominal por la capacidad efectiva puede medirse mediante tasas como la  $OB/OA$ , para cada mezcla de productos que se considere. Como puede notarse, para una misma relación de precios entre ambos productos, para la capacidad efectiva cuyo aumento no ha sido neutro corresponderá una mezcla de productos distinta ( $a', b'$ ) de la contemplada por diseño ( $a, b$ )

segunda instancia, a través de esfuerzos de ingeniería de planta (vgr. modificando la localización o condiciones de la reacción), pueden llegar a neutralizarse los efectos corrosivos del insumo químico. Por tanto, después de cierto tiempo la capacidad efectiva, y con ella el quantum de producción, podrán retornar a su nivel inicial. Sin embargo, las condiciones iniciales de diseño se habrán alterado: el proceso admitirá ahora una calidad de insumos químicos distinta a la originalmente prevista.

(ii) El nivel de demanda puede aumentar sustancialmente, de modo de permitir colocar en el mercado una mayor producción que la actual. Si el nivel de producción estaba por debajo de la capacidad nominal -y de la efectiva- éste podrá aumentar. El coeficiente de utilización de ambas capacidades, que hasta ahora suponemos coincidentes, aumentará en igual medida. Pero ni la capacidad efectiva ni la nominal variarán. Si la demanda sigue aumentando, es posible, -a través de esfuerzos de ingeniería de planta- romper algunos cuellos de botella (vgr. en la capacidad de transferencia de calor o de movimiento de fluidos), y así aumentar la capacidad efectiva por encima de la nominal. De este modo el nivel de producción podrá aumentar, dejando de estar constreñido por la capacidad nominal. El coeficiente de utilización de la capacidad nominal será mayor que uno, en tanto que el de la capacidad efectiva será menor o igual que uno.

En ambos casos, los movimientos en la capacidad efectiva -y, con ella, en el nivel de producción- no hubiesen sido posibles si las condiciones nominales hubiesen sido tan rígidas (en el caso i ), o hubiesen estado tan optimizadas (en el caso ii ), como para no admitir modificaciones y mejoras.

En síntesis, las condiciones iniciales de diseño, a ser analizadas en detalle más abajo, brindan el marco para las adecuaciones de la capacidad efectiva a condiciones más ventajosas de operación, y éstas, a su turno, determinan las posibilidades de respuesta del nivel de producción a las condiciones de mercado.

Los movimientos en el nivel de producción son sensibles en el corto plazo. Los de la capacidad efectiva, en el mediano plazo (entre unos pocos meses y unos pocos años). Finalmente, las condiciones iniciales de diseño proyectan su influencia durante toda la vida de la planta, excepto, desde luego, que se sustituyan y redimensionen sus equipos principales con lo cual la planta pierde su identidad inicial.

Por 'performance técnica' de planta significaremos, en lo que sigue, el curso de la capacidad efectiva a través del tiempo. Ahora bien, a medida que se va mejorando la performance técnica a través de esfuerzos de ingeniería de planta, ésta va alcanzando condiciones de operación que en algún momento se tornan difíciles de superar. Se trata del momento en que se agota el potencial adaptativo, y con él, la explotación de las economías latentes de escala. Cuando se arriba a ese momento, la planta entra en un período estacionario en cuanto al curso de su capacidad. A la máxima capacidad efectiva que alcanza la planta denominaremos capacidad terminal. Esta es, por tanto, aquélla que, una vez alcanzada, la planta va reiterando año en año, hasta su cierre o hasta que se decida sustituir sus equipos principales y ampliar su capacidad por medio de inversiones significativas en activo fijo.

### III.2. Alcances del análisis habitual. Amplitud del problema

Como queda dicho, para que se pueda superar la capacidad contratada bajo condiciones normales y sostenidas de operación -como se verá más adelante, el criterio de 'normalidad' puede cambiar a lo largo del tiempo-, es preciso que la planta esté dotada de flexibilidad. Este atributo es familiar para los ingenieros de proceso si bien, hasta donde sabemos, no ha merecido un estudio sistemático, excepto desde enfoques parciales, en cuanto a sus causas y sus consecuencias 2/.

Menor aun ha sido la atención que ha recibido en el análisis económico, en cuyo plano sólo existen el período corto, durante el cual la capacidad es fija e inamovible, y el período largo, cuando es posible modificar la capacidad de una planta sustituyendo lo esencial del equipo fijo que la compone.

Una destacable excepción es la de Chenery. En su artículo "Overcapacity and the Acceleration Principle" (1952), incluye explícitamente el concepto de flexibilidad y de plazo intermedio o 'intertemporal' para explicar el efecto de las economías de escala en la determinación de la capacidad -o sobrecapacidad- óptima. Dado que Chenery no procura analizar ese concepto per se, sino en el contexto de la influencia de las economías de escala en el comportamiento inversor, considera tan sólo (como se verá más adelante) una variante específica, aunque no por ello menos importante, del mismo. Similares enfoques, basados en funciones de producción ingenieriles según la metodología originalmente propuesta por Chenery, han sido realizados por Cookenboo y por Pearl y Enos 3/.

Una planta puede ser subdividida en unidades que deben ser instaladas al mismo tiempo, pero cuya capacidad individual óptima puede ser determinada separadamente. En el ejemplo tratado por Chenery (1952), la transmisión de gas natural, es posible aumentar la capacidad efectiva agregando más compresores a una línea (gasoducto) de diámetro dado. Dado el nivel inicial de demanda, el número de compresores puede ser al comienzo menor del que correspondería al mínimo costo medio a largo plazo, e ir adecuándose a una demanda en crecimiento. Esto implica que, por su fuerte indivisibilidad, puede convenir instalar la línea con una capacidad mayor a la que justifica el nivel de la demanda -al momento de su instalación- por cuanto, dada su dominante ponderación en el costo total del sistema, es más conveniente ir adecuando el número de compresores que propulsan el gas que ir cambiando gasoductos a medida que crece la demanda. Esto, desde luego, dentro de ciertos límites: llega un momento en que el costo operativo de continuar agregando compresores pasa a ser mayor que el que resultaría de duplicar el gasoducto.

Como éste, pueden extraerse variados ejemplos análogos de las industrias de proceso. En el caso de la producción de olefinas, donde el tren de fraccionamiento -particularmente torres- pesa mucho en el costo de inversión, puede

---

2/ Ver, por ejemplo, Kittrell, J. R. y Watson, C.C. (1966).

3/ Véase, Chenery, M.B., (1952), (1949), (1953); Cookenboo, L., (1954); y Pearl, D.J. y Enos, J.L., (1975).

haber una flexibilidad sustancial por cuanto los demás equipos (intercambiadores, cañerías, bombas, etc.) pueden ir adecuándose modularmente con arreglo a lo que justifique el crecimiento de la demanda. Similares casos pueden citarse en generación de energía, siderurgia, metalurgia, etc.)

En algunos trabajos sobre curvas de aprendizaje también se ha encontrado, como fenómeno bastante habitual, el caso de plantas cuya capacidad efectiva supera sustancialmente su capacidad nominal. Sin embargo, esto se ha adjudicado al aprendizaje tecnológico de manera disociada de las condiciones iniciales de diseño. Este punto será objeto de examen detenido en el capítulo VI.

Chenery nos brinda, por tanto, una instancia especial de flexibilidad, relevante para aquellos casos que consisten en procesos conformados por operaciones en secuencia, de materiales homogéneos y operaciones estandarizadas, con equipos sujetos a fuertes indivisibilidades. La instancia es especial o particular por cuatro razones: (i) sólo se refiere al caso en que la capacidad efectiva puede superar a la capacidad de diseño, pero no al caso opuesto; (ii) la flexibilidad se origina en la presencia de indivisibilidades físicas, aunque también puede obedecer a otras causas; (iii) la flexibilidad es enteramente planeada -en función de una política de capacidad óptima a través del tiempo-, pero puede ocurrir que no lo sea, y (iv) como se desprende de (iii), existe prácticamente total certidumbre respecto del grado de flexibilidad de la planta, aunque pueden existir diversos márgenes de incertidumbre al respecto. Algunos de estos puntos serán ahora examinados, en tanto que otros serán tratados más adelante.

En primer lugar, la flexibilidad puede no ser anticipada ni mucho menos planeada. Ello puede ocurrir, por ejemplo, cuando la determinación de las condiciones de diseño se realiza con prescindencia total o parcial del cálculo del óptimo dimensionamiento de la planta; o bien, cuando, a pesar de que dicha disociación no acontezca, existan incertidumbres técnicas e imperfecciones en el mercado de información que dificulten o imposibiliten el cálculo de la capacidad óptima en el tiempo, en cuyo caso puede que la flexibilidad ni siquiera sea anticipable. Pueden existir también otras razones que serán más sistemáticamente examinadas en el capítulo IV.

En segundo término, el concepto de flexibilidad tan sólo es útil para explicar bajo qué condiciones la capacidad efectiva puede llegar a superar la capacidad nominal, pero no por qué no pueda alcanzarla o superarla. Es obvio que esta situación difícilmente sea planeada (no existe una teoría de la 'subcapacidad óptima'). Es preciso indagar entonces acerca de los factores a que pueda responder. Nuestra hipótesis, avalada por los casos estudiados, es que, en la realidad, la existencia de flexibilidad es frecuentemente no planeada y que, bajo ciertas condiciones -vgr. elevado costo de capital en relación a otros insumos- la rigidez de la capacidad efectiva respecto de la nominal puede ser habitual.

Por su mayor simetría, en lugar de utilizar el concepto de flexibilidad, preferimos emplear el de sobrediseño, que viene definido por:

$$\phi = \frac{\sum_{t=1}^{t=n} Qe_t / t}{Qn} - 1$$

donde,

$\phi$ : margen de sobrediseño

$t=1$

$\sum_{t=1}^{t=n} Qe_t / t$ : Capacidad efectiva media anual durante el período de vida operativa de la planta ( t años).

$Qn$ : Capacidad nominal o contratada.

Cuando  $\phi$  es mayor que cero, hay sobrediseño; cuando  $\phi$  es menor que cero hay subdiseño. Sus límites habituales de oscilación son  $-.30 < \phi < 3.$

### III.3. Sobrediseño y subdiseño

Según el procedimiento habitual, especialmente en las industrias de proceso, una vez que una firma ha seleccionado el proceso y la escala con que juzga preferible operar, procede luego a asegurarse la licencia para utilizar ese proceso y contratar los servicios de ingeniería de diseño, construcción y montaje. Si, al cabo de cierto tiempo tras el cual la planta entra en régimen normal de operación, la capacidad efectiva de esa planta -tal como fue definida más arriba- supera la capacidad contratada, nos confrontamos con una constancia de la posibilidad de que haya sobrediseño. Si, por el contrario, al cabo de ese período, ocurre que no es posible alcanzar la capacidad contratada en el corto plazo, entonces es probable que la planta haya sido subdiseñada <sup>4/</sup>.

Antes de avanzar en la caracterización de estas variantes, parece conveniente efectuar algunas aclaraciones preliminares.

Hasta ahora hemos venido haciendo referencia a la planta. Sin embargo, el concepto de sobrediseño puede igualmente ser aplicado a un complejo interconectado, en cuyo caso la relación entre las plantas que lo componen se trata de manera análoga a la relación entre las operaciones unitarias que constituyen la planta.

En segundo término, no debe confundirse el concepto de sobrediseño (positivo o negativo) con el de sobredimensionamiento (positivo o negativo, respectivamente). Hay sobredimensionamiento cuando la escala adoptada y la capacidad contratada divergen de la capacidad de absorción del mercado.

---

<sup>4/</sup> Puede ocurrir que, en algún momento, la capacidad terminal de la planta (máxima capacidad efectiva alcanzada) llegue a superar a la capacidad contratada, pero que lo haga recién tras muchos años de operación, con lo cual ello puede ser consistente con una capacidad efectiva media inferior a la contratada (subdiseño).

Esto puede obedecer a un error de cálculo o a opción deliberada. Por tanto, puede existir una planta sobredimensionada (con capacidad contratada superior a la capacidad de absorción del mercado) que esté subdiseñada (con una capacidad efectiva media inferior a la capacidad contratada). Y puede existir una planta subdimensionada (con capacidad contratada inferior a la que justifica el mercado) que haya sido sobrediseñada (con una capacidad efectiva media superior a la nominal).

Tercero, cuando desde el punto de vista del equilibrio interoperacional de una planta, una operación unitaria tiene mayor (menor) capacidad de la necesaria, esa operación unitaria estará sobredimensionada (subdimensionada), lo cual podría dar lugar a que la planta en su conjunto resulte sobrediseñada (subdiseñada).

En cuarto término, la capacidad efectiva puede superar (o no alcanzar) la capacidad contratada:

(i) con esfuerzos de optimización solamente, o bien,

(ii) con esfuerzos de optimización plus esfuerzos de ingeniería que impliquen modificaciones en las condiciones iniciales de diseño (mediante ruptura de cuellos de botella).

Aquí nos encontramos, subsiguientemente, con dos acepciones del sobrediseño. Cuando  $\phi > 0$ , la versión fuerte implica que sólo se toman en cuenta esfuerzos de optimización, en tanto que la versión débil corresponde a aquel margen de sobrediseño que se pone de manifiesto tras esfuerzos de optimización y de modificación de las condiciones iniciales. Cuando  $\phi < 0$ , la versión fuerte corresponde al margen que se manifiesta tras la realización de esfuerzos de optimización y modificación, en tanto que la versión débil implica sólo esfuerzos de optimización. Sintetizamos lo anterior en el Cuadro 1, que incluye valores indicativos de los márgenes de sobrediseño (positivo y negativo):

Cuadro 1. Sobrediseño: intervalos de referencia

Margen de sobrediseño	Esfuerzos de ingeniería de planta	
	(i)	(ii)
$\phi < - .25/- .20$	sDf	sDf
$-.25/- .20 \leq \phi \leq -.15/- .10$	sDd	sDf
$-.15/- .10 \leq \phi \leq .10/ .15$	"DE"	dudoso
$.10/.15 \leq \phi \leq .15/.25$	dudoso	"DE"
$.15/.25 \leq \phi \leq .50$	SDf	SDd
$\phi > .50$	SDf	SDf

sDd : subdiseño débil  
sDf : subdiseño fuerte  
SDd : sobrediseño débil  
SDf : sobrediseño fuerte  
"DE": "diseño equilibrado"

Supóngase que el promedio de la capacidad efectiva de la planta durante el curso de su vida operativa se ha mantenido debajo de un 75-80 por ciento de la capacidad contratada. En este caso se puede hablar de un fuerte subdiseño, tanto más cuanto si, para alcanzar ese nivel de capacidad efectiva media, ha sido preciso introducir modificaciones mejorativas al diseño original. En cambio, si la capacidad efectiva media ha oscilado entre un 75-80 por ciento y un 85-90 por ciento de la capacidad contratada y, para ello, fue necesario mejorar las condiciones iniciales de diseño, aun nos encontraremos frente a un caso de fuerte subdiseño. Pero, si fue tan solo preciso realizar esfuerzos de optimización para alcanzar tal performance técnica, claramente se tratará de un caso más débil de subdiseño.

Contrariamente, si la capacidad efectiva media de la planta llega a superar en un 50 por ciento a la capacidad contratada, sin duda se tratará de una planta fuertemente sobrediseñada, tanto más cuanto si, para ello, han bastado meros esfuerzos de optimización. En cambio, si la capacidad efectiva media fluctúa entre un 15-25 por ciento y un 50 por ciento de la capacidad contratada, aun se tratará de un caso de fuerte sobrediseño en caso de que, para alcanzar esa capacidad efectiva media, haya sido tan solo necesario recurrir a esfuerzos de optimización; pero resultará una variante más débil de sobrediseño si también fue preciso comprometer esfuerzos no rutinarios de ingeniería de planta que involucraran modificaciones en las condiciones iniciales de diseño.

Los casos señalados como 'dudosos' no permiten emitir juicio con arreglo a la sola información presentada respecto de la intensidad del sobre o subdiseño. Aquí se encontraría involucrado un juicio de valor en cuanto a la medida en que los esfuerzos creativos de ingeniería deban ser considerados como 'normales' y, por tanto, imputarlos o no en la definición de régimen normal de operación.

En realidad, en la medida en que esos esfuerzos se realizan de manera permanente, año tras año, y en que, como resultado, vaya mejorándose la productividad de la planta, es difícil definir un concepto unívoco de 'régimen normal de operación', puesto que se trata de un estado que la planta sólo alcanza fugazmente: es sólo un punto o un segmento discontinuo en el eje temporal.

En lo sucesivo, cuando hablemos de sobrediseño habremos de referirnos a la versión débil; y cuando hablemos de subdiseño connotaremos la versión fuerte. En otros términos, en todo momento incluiremos el supuesto de que se realizan esfuerzos de ingeniería no rutinaria (resolución de problemas, ruptura de cuellos de botella, mantenimiento preventivo) que lleven a la planta a sus mejores condiciones posibles de operación durante el transcurso del tiempo.

El concepto de 'diseño equilibrado', por su parte, es puramente formal. Se refiere al caso en que la capacidad efectiva que se alcanza es aproximadamente similar a la capacidad nominal.

Distinto es, desde luego, el concepto de 'diseño óptimo'. Este concepto puede ser sólo aproximadamente definido como aquel diseño que se realiza a partir de un juego de precios relativos considerados socialmente óptimos, que incorpora el papel de las incertidumbres respecto del curso futuro del conocimiento de la demanda y de los precios. Tan solo en un contexto estático podría ser taxativamente definido. En un contexto dinámico se refiere mas bien

a una trayectoria temporal de acercamiento aproximado a objetivos móviles con arreglo al avance del conocimiento y al curso de las condiciones económicas.

Un diseño puede ser equilibrado tan solo en apariencia. En realidad, la aproximación de la capacidad efectiva a la nominal puede no ser más que la resultante de la coexistencia de una serie de factores de sobre y de subdiseño. Por ejemplo, la planta puede estar sobrediseñada a raíz del sobredimensionamiento de un reactor donde se produce una reacción catalítica, pero puede estar subdiseñada en términos del tipo de catalizador que se previó en las condiciones iniciales de diseño. Ambos factores pueden neutralizarse mutuamente, con lo cual la capacidad efectiva podrá coincidir con la de diseño, pero estar encubriendo desequilibrios subyacentes en la planta. Si, a través de esfuerzos de ruptura de cuellos de botella, la capacidad efectiva no puede ser llevada por encima de un 15-20 por ciento de la capacidad contratada, el diseño de la planta aparecerá como 'equilibrado', a pesar de contener factores de sobrediseño que importa identificar.

El margen exacto de sobrediseño sólo puede llegar a conocerse ex-post, una vez operada la planta por el tiempo necesario para alcanzar la capacidad terminal. Sin embargo, un análisis detenido de la condición inicial de diseño puede permitir identificar de antemano posibles factores de sobre y subdiseño. De esta manera pueden llegar a ahorrarse muchos esfuerzos y recursos posteriormente. Esto raramente se hace, en parte por desconocimiento o despreocupación respecto del problema y en parte por dificultades de acceso a información <sup>5/</sup>. Por otra parte, a través de la experiencia de ingeniería que acrece durante sucesivas generaciones de planta, es posible preveer cada vez con mayor certeza la naturaleza y magnitud de las discrepancias potenciales entre capacidad efectiva y capacidad nominal en relación a procesos particulares y, así, anticipar la mayor cantidad de adaptaciones y mejoras durante el período previo a la puesta en marcha y/o utilizar esta información durante el período de planeamiento de la inversión.

#### III.4. Las condiciones iniciales de diseño

En el capítulo IV nos ocuparemos de las variables que explican como se determina la condición de diseño. Veamos ahora con algún detalle en qué consiste.

La condición de diseño viene definida esencialmente en lo que se denomina el 'paquete de ingeniería básica'. Este incluye los datos básicos del diseño; a saber:

esquema del proceso principal y de los servicios auxiliares con indicación de flujos y parámetros intensivos;

esquema de cañerías e instrumentos;

---

<sup>5/</sup> Por ejemplo, es muy difícil para las firmas propietarias de proyecto tener acceso a las rutinas de cálculo empleadas por la firma de ingeniería en el proceso de diseño.

balance material y energético del proceso principal y de los servicios auxiliares;

especificación de los equipos principales; y

esquema de distribución de los equipos.

En la definición de estas condiciones de diseño se apela al concurso de varias disciplinas ingenieriles en el contexto de criterios de rentabilidad. Los balances de materia y energía establecen las necesidades de materias primas, energía, agua de enfriamiento, etc., para el proceso. La termodinámica proporciona la solución de equilibrios líquido-vapor y químico, y la de compresión y licuefacción, entre otros. Los principios de las operaciones básicas y de los fenómenos de transporte se emplean para calcular en forma precisa elementos del proceso, en tanto que los métodos de control y dinámica de procesos aseguran su buen funcionamiento.

En el paquete de ingeniería básica se definen los rasgos fundamentales del proceso y sus condiciones de operación -incluyendo mantenimiento y servicios- para su directa implementación en las siguientes etapas de realización ingenieril (detalle, compras, montaje, puesta en marcha), dadas las materias primas, localización, mezclas de productos y subproductos, etc., que han sido previamente acordados con el propietario del proyecto.

En la realización de las siguientes etapas de ingeniería pueden llegar a introducirse algunas alteraciones -vgr. en la especificación de algunos equipos secundarios o de algunos materiales-, pero las condiciones iniciales de diseño son definidas en lo fundamental por quienes elaboran la ingeniería básica. Por lo demás, quienes tienen a su cargo esta prestación toman (o deberían tomar) los recaudos necesarios como para que dichas alteraciones, en caso de verificarse, lo hagan dentro de márgenes que no desvirtúen las bases del diseño.

Los criterios o bases de diseño con arreglo a los cuales se realiza la ingeniería básica pueden incluir objetivos tales como: baja inversión de capital, flexibilidad en el empleo de insumos, selectividad del rendimiento, bajo consumo específico, alta eficiencia térmica, conceptos de diseño probados y confiables, facilidad de operación, simplicidad de diseño, etc. Es obvio que, cuanto menor sea la participación del propietario del proyecto en la definición de estos criterios, mayor será la discrecionalidad que la firma que suministra la ingeniería básica ejerza en su elección y mayor será, por consiguiente, la posibilidad de inadecuaciones del diseño a las condiciones específicas -económicas, ecológicas, etc.- del emplazamiento de la planta.

Los factores posibles de sobre o subdiseño que adolezcan las condiciones iniciales de diseño pueden referirse a las operaciones principales del proceso, o a los servicios auxiliares. A su vez, estos factores pueden o no tener incidencia sobre la performance técnica de la planta y pueden afectar su economicidad ya sea directamente o a través de su influencia sobre la performance técnica. Veamos algunos ejemplos.

El clima en el país de emplazamiento de la planta puede ser más benigno que aquél donde se originó el diseño. Pueden existir, por tanto, menos requerimientos de calefacción y de ventilación en los edificios, de aislamiento de

equipos, de operar en sitios cerrados, de calcular techos para soportar cargas de nieve ni de enterrar tuberías para protegerlas de heladas. En cambio, puede ser necesario tener en cuenta huracanes, terremotos, monzones, etc. "Con demasiada frecuencia ... se sobrecalcula inadvertidamente la planta, ya que las condiciones climáticas consideradas en el diseño original casi nunca se manifiestan en forma explícita en las especificaciones del diseño" <sup>6/</sup>. También pueden haber lujos innecesarios ('gold plating') para la escala de planta que se desee, aunque pueden ser habituales en el país de origen del diseño: aire acondicionado y música funcional en las oficinas, copiadoras ultramodernas, interfonos y, en general, instrumentación superflua.

Todos estos factores de sobre o subdiseño si bien afectan la economicidad de la inversión, no influirán de ninguna manera significativa sobre la performance técnica. Por tanto, distinguimos entre aquellos factores de sobre o subdiseño que inciden sobre el aprendizaje tecnológico y aquellos que no lo hacen, aunque pueden dar lugar a una experiencia que conduzca a plantas más económicas. Aquí estamos, desde luego, más interesados por el primer tipo de factores. Ellos son los relativos a:

rangos de condiciones de operación (márgenes de seguridad, equilibrios térmicos y másicos, rangos de destilación, etc.);

flexibilidad de productos y subproductos;

flexibilidad de capacidad;

distribución de equipos;

reciclaje y recuperación de subproductos;

equipos auxiliares;

control del proceso;

materiales de construcción;

instalaciones auxiliares;

especificación de equipos;

especificaciones mínimas de los productos;

requerimientos de calidad de la mano de obra;

condiciones de mantenimiento.

En los dos casos estudiados en más detalle (ver Capítulo II y Apéndices A y B), se ennumeran una serie de factores de sobre y subdiseño referidos a estos aspectos concernientes a las definiciones de la ingeniería básica. Una subestimación de los requisitos de mantenimiento que implique suponer menores

---

<sup>6/</sup> Ver: Giral, J., (1974).

tiempos de parada, o una disposición de los equipos -lay-out de planta- que dificulte su normal atención dan lugar a factores de subdiseño. Por su parte, una subestimación de los rangos de calidad de materias primas disponibles o de la posibilidad de recuperar subproductos -que pueden tener bajo valor en el país de origen del diseño, pero elevado en el país recipiente- constituyen factores de sobrediseño 7/

En general, puede esperarse que los primeros factores que habrán de ponerse de manifiesto durante el curso de la vida operativa de una planta serán los de subdiseño, por cuanto éstos implicarán dificultades para alcanzar la capacidad nominal. Posteriormente, si los hay, los factores de sobrediseño darán lugar a que los esfuerzos de ingeniería de planta los exploten con objeto de aumentar la capacidad efectiva más allá de la nominal.

Cierto es que aumentos en la capacidad efectiva no tienen porqué ser el único -ni siquiera uno- de los objetivos en pos de los cuales se realicen esfuerzos de ingeniería de planta. Estos pueden apuntar a reducir costos unitarios, a ahorrar capital, etc. Empero, cuando se trata de plantas con operaciones continuas y de elevada intensidad de capital, como son las del tipo que estamos considerando, dichos objetivos usualmente se obtienen por medio de aumentos de capacidad efectiva. Tal es el caso cuando se trata de empresas que se confrontan con una demanda en crecimiento. Como ya se ha visto, los aumentos de capacidad efectiva no tienen porqué excluir en nuestro análisis modificaciones en la mezcla de productos y también habremos de contemplar todo aquel otro tipo de innovaciones menores que se expresen, de manera directa o indirecta, en aumentos de la capacidad efectiva. De hecho, como puede verificarse en los ejemplos considerados, estos aumentos no están disociados de cambios en las condiciones de producción tales como modificación de calidad de insumos, ahorros unitarios de energía, alteraciones en la mezcla de productos, etc.

De los casos estudiados (ver apéndices A y B), se desprende la escasa incidencia que las firmas clientes ejercen sobre la determinación de los criterios que definen las condiciones iniciales de diseño. Esto, en parte, se debe a ignorancia respecto de la importancia del problema. Pero también, más fundamentalmente quizás, a que no se dispone de tiempo para realizar la evaluación respectiva y a insuficiencia de capacidad e información 8/. Los clientes se remiten por lo usual a las garantías que acuerdan los proveedores del proceso y de la ingeniería básica pero, de hecho, estas revisten un carácter más formal que real. Examinemos este último punto con mayor detalle.

Dichos proveedores, por lo general, lo que garantizan respecto del proceso es su rendimiento y capacidad de procesamiento sobre bases diarias. La capacidad

---

7/ Puede ocurrir que una operación sea muy sensible en su rendimiento ante cambios de una variable. Por ejemplo, si se diseña un reactor para operar cerca del punto de ignición, una variación en el caudal del alimento del reactor puede extinguir la reacción en el mismo, causando la interrupción del proceso. Si ocurre de manera frecuente, ello se constituirá en un factor de subdimensionamiento. En la medida que esa operación sea crítica para la performance técnica de la planta, se verificará una situación de subdiseño.

8/ Se dispone usualmente sólo de unos pocos días para considerar, revisar, evaluar y aprobar la ingeniería básica, que suele consistir en una cantidad de gruesos volúmenes de elevado nivel técnico.

anual es calculada multiplicando la capacidad diaria por 330 o 350 días al año -esto es, suponiendo un mínimo de paros por mantenimiento, reparación, servicio y contingencias imprevistas. Normalmente, las pruebas de funcionamiento, a cuyo término las garantías deben o no darse por satisfechas, se realizan durante sólo 72 horas. Esto implica que cualesquiera problemas que surjan cuando el proceso deba operarse -como es de suponerse- por un período superior a los 3 días, ya sea por vicios ocultos en los equipos que se pongan de manifiesto tras varios meses de operación, o por problemas de corrosión, o de velocidad de uso de los equipos, etc., no habrán de ser cubiertos por las garantías. Es usual que las visitas que se efectúan a plantas similares del exterior tengan lugar después que los contratos han sido firmados. Por esta razón, el beneficio de esta experiencia de terceros, en el mejor de los casos, tan solo permitirá una cierta anticipación a los esfuerzos que habrán de realizarse para combatir y solucionar esos problemas. Por otra parte, esas visitas pueden aportar bastante poco cuando la planta contratada incluye combinaciones inusuales de procesos.

Ciertamente, esos y otros problemas técnicos pueden ponerse de manifiesto durante la misma puesta en marcha. ¡Pero esta puede llegar a demandar entre unos pocos días y muchos meses! Si bien ello constituye una excelente experiencia para la firma de ingeniería en función de futuros contratos, la firma propietaria del proyecto debe correr con los perjuicios, a veces ingentes en términos de lucro cesante e inversiones adicionales.

En este capítulo se definieron los conceptos de capacidad nominal, capacidad efectiva, capacidad terminal, sobrediseño, subdiseño, sobredimensionamiento, subdimensionamiento y condiciones iniciales de diseño. Como se verá, estos conceptos resultan necesarios para una exploración teórica de la problemática relativa al potencial adaptativo de procesos y a su vinculación con el aprendizaje tecnológico en planta y en el diseño de procesos.



## IV. LA FUNCION DE SOBREDISEÑO

### IV.1. Naturaleza del Diseño de Procesos

Dado un determinado estado del conocimiento de los principios que rigen las transformaciones físicas y químicas, es posible diseñar, con base en información puramente técnica, una variedad muy amplia de procesos alternativos para fabricar un producto o producir un servicio dados.

Se puede así pensar en una 'función de producción ingenieril'. Esta suministra el vínculo ente la minucia del conocimiento técnico detallado y las posibilidades de producción. Lo hace a partir de tres elementos: fuentes de energía, medios de transformación de la energía y medios de control. Las alternativas de cada elemento pueden ser descritas en términos de sus características físicas (pureza, peso, densidad, voltaje, velocidad, pericia, etc.). El conjunto de estas características y sus variadas combinaciones mutuas conforman el contenido del conocimiento técnico requerido para diseñar procesos.

Ese conocimiento puede ser denotado bajo la forma de un sistema de ecuaciones que expresen todas las combinaciones posibles. Estas ecuaciones son resueltas en términos de los insumos requeridos. Así, se determina una aproximación a la 'función de producción fundamental'. Esta contiene el rango de alternativas derivadas de todos los posibles diseños a partir de las múltiples relaciones específicas que conforman el stock del conocimiento técnico.

En la mayoría de los diseños quedan inicialmente sin especificar los valores de algunas de las variables. Estos pueden ser fijados en función de ciertos criterios y sujeto a ciertas restricciones. El primer problema en el cálculo de un diseño nos remite a la identificación de estas variables libres. Su número representa los grados de libertad del diseñador.

Se comienza por tabular las variables que intervienen en el diseño para cada unidad del proceso y las relaciones que las conectan. El comportamiento de cada componente del proceso puede ser descrito aproximadamente por medio de ecuaciones, recomendaciones de fabricantes, programas de ordenador, datos de planta piloto para cambio de escala, etc.

Las relaciones de diseño están basadas en leyes analíticas y en leyes sintéticas. Las primeras corresponden a aplicaciones especiales de las leyes más generales de la física y de la química. Contienen parámetros que representan propiedades que pueden ser experimentalmente determinadas. Las segundas están basadas en experiencia operativa antes bien que en teoría científica. También son utilizadas en el diseño de equipo, pero no son válidas más allá del rango de experimentos que le sirven de base.

La necesidad del empleo de métodos no analíticos obedece a que difícilmente haya algún proceso tan perfectamente comprendido como para que pueda ser diseñado tan sólo a partir de soluciones teóricas.

Las relaciones de diseño consisten, pues, en  $N$  fuentes independientes de

información relativas a  $M$  variables  $X_j$  (tamaño de equipo, condiciones de operación, condiciones de las corrientes<sup>j</sup> de unión, etc.). Cuando, para un problema de diseño bien formulado,  $M > N$ , existen algunas variables cuyos valores no están especificados que ofrecen una gama de condiciones de operación posibles. El diseñador queda en libertad para elegir los que considere más convenientes. El número de grados de libertad ( $M-N$ ) determina cuántas variables pueden elegirse como variables de diseño ( $d$ ), cuyos valores son fijados libremente. Al resto se las denomina variables de estado ( $s$ ). Una vez que se han asignado valores específicos a las variables de diseño, los valores de las variables de estado se obtienen mediante la solución de las relaciones de diseño. Estas asumen la siguiente forma:

$$f_i (d_j, s_k) = 0$$

donde,

$i = 1, 2, \dots, N$ : N° de relaciones de diseño

$j = 1, 2, \dots, F = M - N$ : N° de grados de libertad

$k = 1, 2, \dots, N$ : N° de variables de estado dependientes 1/

Normalmente, cuando una variable implica la elección entre un número discreto de alternativas - vgr. la temperatura de reacción puede oscilar en un proceso dentro de un intervalo de  $10^\circ\text{C}$  -, se la selecciona como variable de diseño. Esta constituye una de las reglas intuitivas que emplea el diseñador.

Cuando los problemas son complejos (puede haber un centenar de ecuaciones y otras tantas variables de estado, en cuyo caso habría  $100! = 10^{300}$  maneras de ordenarlos), se utilizan algoritmos de selección de las variables de diseño. Mediante el análisis de las estructuras particulares del flujo de información de un sistema se obvian también las dificultades que origina la presencia de lazos de recirculación. Esto se hace reselectionando convenientemente las variables de diseño en un proceso de carácter iterativo.

1/ Por ejemplo, en el caso del diseño de un cambiador de calor existen trece variables fundamentales; a saber: (i) tipo de cambiador (tubo con aletas, doble tubo, flujo en contracorriente, etc.); (ii) calor transferido; (iii) área de intercambio; (iv) coeficiente global de transmisión de calor; (v) caudales másicos de los fluidos (cuatro variables); (vi) temperaturas (cuatro variables); (vii) media logarítmica de la diferencia de temperaturas.

El número de relaciones de diseño entre estas variables asciende a siete: (i) definición del coeficiente de transmisión de calor; (ii) definición de la media logarítmica de la diferencia de temperaturas; (iii) conservación de la masa (dos relaciones); (iv) energía transferida entre las dos corrientes (dos relaciones); (v) definición del coeficiente global de transmisión de calor.

Los grados de libertad suman, por tanto, seis. Si el cambiador ha de realizar un servicio dado inserto en un sistema mayor, quedando definidos los valores de las temperaturas de los caudales másicos y del agua de refrigeración, se consumen ya cuatro de los seis grados de libertad al integrarse el cambiador en tal conjunto. Las dos variables libres restantes podrán entonces ajustarse discrecionalmente, consumiendo los restantes grados de libertad y permitiendo resolver las ecuaciones de diseño para obtener las otras variables de interés. Por más detalles ver Rudd y Watson, op. cit.

Los criterios de diseño definen qué uso hacen los diseñadores de los grados de libertad. "El ingeniero debe definir el entorno económico en que funcionará el proceso y establecer un criterio que, seguido durante el diseño, pueda conducir al proceso económicamente óptimo". 2/ En este procedimiento se confrontan dos limitaciones desde el punto de vista de quien contrata los servicios de diseño:

(i) Casi ningún proceso industrial es tan completamente conocido como para que una nueva planta pueda ser diseñada solamente a partir de una solución analítica. Hay amplios márgenes de diseño empírico; esto es, basado no en deducción analítica sino en extrapolación de sistemas más o menos similares. Por tanto, el conocimiento respecto de cómo el proceso debe ser adaptado respecto de condiciones económicas cambiantes es bastante limitado e impreciso. De hecho: "el diseñador tiende a fijar su atención en aquello que su proyecto anterior ha demostrado ya ser útil; considerará, así, que éste debe conservarse intacto, 'congelado', en cada detalle, copiándose en todo en el nuevo diseño, excepto en lo que a escala se refiere". 3/

(ii) Debido a que el diseño de una planta industrial consiste en una larga serie de cálculos, usualmente no se considera un rango muy amplio de alternativas de precios, sino meramente se adopta una combinación de insumos que produce al menor costo a los precios considerados. Los cálculos de diseño están así sesgados en favor de las pocas combinaciones de precios consideradas. Por tanto, se van realizando una serie de cálculos de costo mínimo en las distintas etapas progresivas del diseño que va acotando el rango de opciones de manera considerable. Esto implica que durante el diseño se adopta una serie de decisiones cuasi-económicas que preceden y constriñen la elección de quien contrata los servicios de diseño - suponiéndolos un insumo puramente técnico. Análogo es lo que ocurre con las especificaciones de equipo: los costos y precios de insumos influyen los rangos que se diseñan. Así, los equipos disponibles implican un apreciable grado de pre-selección económica. 4/

Dado el alto grado de discrecionalidad que se advierte en la realización del diseño de ingeniería, no es de extrañar que los criterios de diseño no sean siempre explícitos para el propietario del proyecto que contrata con una firma de ingeniería. 5/ También hay una serie de variables endógenas y exógenas al propio grupo de diseño que afectan sus criterios. A continuación se procede a

---

2/ Ibid, p. 94.

3/ Ibid, p. 380. Esto puede dar lugar a dificultades cuando, por ej., una reacción que, por mero cambio de escala, de exotérmica se torne endotérmica o viceversa. Ver cap. V.

4/ Cfr. Salter, W. op. cit.

5/ Esta ignorancia del propietario del proyecto no sólo es usual en los países en desarrollo que importan los servicios de ingeniería de diseño. También se verifica en el caso de clientes de países industriales. Un ejecutivo de Foster Wheeler (New Jersey) nos informó respecto de algunos casos en que, debido a sobrediseño, las plantas de sus clientes alcanzaron una tasa de producción mayor a la contratada. Esto era visualizado por los propietarios de proyectos norteamericanos como un beneficio extra sin que evaluaran los costos involucrados en el sobrediseño. Por un examen de las relaciones costo-beneficio del sobre diseño ver capítulo VI.

examinar la índole de estas variables.

#### IV.2. Variabes que Influyen en la Determinación de los Criterios de Diseño

En esta sección se identifica una serie de circunstancias que, según la experiencia de contratación de servicios de diseño, tanto desde el ángulo de clientes como desde el de proveedores de esos servicios, influyen sobre la determinación de los criterios de diseño aplicados a plantas específicas. Nuestra atención se centrará en particular, sobre la propensión al sobrediseño (absoluto) como variable dependiente.

Las variables a ser consideradas son:

- (i) Incertidumbres técnicas de diseño;
- (ii) Forma de contratación y vínculos propietarios;
- (iii) Financiamiento;
- (iv) Competencia entre oferentes;
- (v) Incertidumbres del cliente;
- (vi) Capacidad técnica del cliente.

Antes de proceder al examen de estas variables explicativas de la propensión al sobrediseño absoluto - como proxy del potencial adaptativo que se confiere al proceso - conviene efectuar un par de aclaraciones previas.

La mayor parte de las variables consideradas se sustrae normalmente al control del propietario del proyecto. A la propensión al sobrediseño que resulta de su influencia denominamos sobrediseño no planeado.

Sin embargo, el cliente tiene la posibilidad de incidir deliberadamente sobre el margen de sobrediseño solicitándole a la firma de ingeniería que lo contemple. Al sobrediseño deliberado que se realiza a instancias de la firma propietaria del proyecto denominamos sobrediseño planeado.

Cierto es que no todo margen de sobrediseño no planeado - esto es, realizado sin conocimiento exante del cliente - es imprevisto. La firma de ingeniería puede ser bien consciente de su existencia, aunque no lo sea la firma cliente. Pero como quien, en definitiva, habrá de hacerse cargo de la suerte que corra el proyecto durante su vida operativa es esta última, es preferible no considerar esa parte del sobrediseño de la cual es consciente la firma de ingeniería, pero no la firma cliente, como diseño planeado. De hecho, debe presumirse que, dentro de lo permisible por incertidumbre e imperfecciones en el mercado de información, la firma de ingeniería es usualmente consciente de la magnitud aproximada del sobrediseño conferido a un proceso específico.

Estudiamos ahora la naturaleza de las variables explicativas de la propensión al sobrediseño.

(i) Incertidumbres técnicas de diseño.

Aún en el supuesto más favorable, esto es, que el grupo de diseño cuente con la mejor información, técnicas y bagaje científico disponibles, es inevitable la presencia de incertidumbres técnicas de diseño.

Es usual que el ingeniero trabaje anticipándose al avance de las ciencias básicas. Por ej., los procesos de recuperación de magnesio del agua de mar se diseñaron y operaron rentablemente bastante antes de que se conociesen todos los detalles científicos de los fenómenos que tienen lugar en ellos. Se confrontan, por consiguiente, riesgos asociados a una información inadecuada o incompleta.

Esto conduce, como ya se apuntó, a un amplio margen de diseño empírico. <sup>6/</sup> El componente de incertidumbre es una condición normal del trabajo de diseño. Ello se expresa, por ej., en preguntas tales como: ¿cómo puede efectuarse el diseño de un componente tal como una columna de destilación cuando los datos disponibles sobre eficacias del piso pueden tener un veinte por ciento de error?, o bien, ¿qué influencia tendrá la llegada irregular de materias primas al proceso? La incertidumbre desaparece una vez que el sistema ya se encuentra construido y puede observarse su operación (demasiado tarde ya para obviar las consecuencias de los sesgos conferidos al diseño).

A raíz de la presencia de incertidumbres, se considera siempre un cierto margen de seguridad - que traduce el margen de ignorancia. Frecuentemente los componentes de una planta se diseñan ex-profeso para que tengan mayor duración y sean más flexibles y capaces de lo que aconseja la mejor información disponible con objeto de prever la posible influencia de variables desconocidas. El consiguiente porcentual de sobredimensionado se agrega normalmente de forma empírica: "Las bases teóricas de los factores de sobredimensionado son bastante poco consistentes, debiendo aceptarse más como artículo de fe que como una conclusión científicamente razonada". <sup>7/</sup>

El cuadro de la página siguiente sintetiza la práctica habitual en este área en relación con el diseño de algunos tipos de aparatos. Se indica si suele requerirse la experimentación en planta piloto, la razón aconsejable de cambio de escala y el porcentual de sobredimensionado. Por ej., si se desea diseñar intercambiadores de calor de líquido, evaluando el área de transmisión adecuada, no resulta preciso efectuar ensayos en planta piloto para verificar las temperaturas. Las teorías disponibles permiten extrapolar hasta áreas 100 veces mayores a las de escala experimental, para lo cual debe sobredimensionarse el intercambiador en un 11/18 por ciento a los efectos de prevenir los efectos de posibles errores en los datos básicos o en las ecuaciones.

---

<sup>6/</sup> Podemos notar que, incluso en el diseño de cañerías, se recurre en gran medida a reglas intuitivas. Cfr. Simpson L. Weirick, M.L. (April, 3 1978).

<sup>7/</sup> Rudd and Watson, op. cit.

Cuadro 2. Procedimiento seguido en la práctica industrial para el diseño de algunos tipos de aparatos considerando la incertidumbre

Tipo de aparato	Se precisan datos de planta piloto?	Variable externa	Variable de diseño	Aumento de escala en relación a variable de diseño caudal		Intervalo de sobredimensionado (%)
Filtros prensa	si	Resistencia de la torta o permeabilidad	Area de filtración	> 100:1	> 100:1	11-21
Filtros rotativos	si	Resistencia de la torta o permeabilidad	Area de filtración	25:1	100:1	14-20
Bombas centrifugas	no	Carga de salida	Potencia consumida Diámetro del pulsador	> 100:1 10:1	> 100:1 > 100:1	7-14
Compresores alternativos	no	Razón de compresión	Potencia consumida Recorrido del pistón	> 100:1 > 100:1	> 100:1 > 100:1	7-14
Transportadores de tornillos sin fin	no	Densidad global del sólido	Diámetro	8:1	90:1	8-21
Molinos de martillos	si	Reducción de tamaño	Potencia consumida	60:1	60:1	15-21
Cambiadore de calor de líquido	no	Temperaturas	Area de transmisión	> 100:1	> 100:1	11-18
Condensadores de pulverización	no	Calor latente y temperaturas de vaporización	Razón, altura a diámetro	12:1	70:1	18-24
Columnas de pisos	no	Datos de equilibrio	Diámetro	10:1	> 100:1	10-16
Columnas de relleno	no	Datos de equilibrio	Diámetro	10:1	> 100:1	11-18
Torres de enfriamiento	no	Humedad del aire	Volumen	10:1	> 100:1	12-20
Ciclones	no	Tamaño de partícula	Diámetro	3:1	10:1	7-11

Fuente: L. Michel, R.D. Beattie y T.H. Goodgame. (1954)

Puede ocurrir que un factor de sobredimensionado específico para un componente de proceso se aplique de modo general a condiciones diferentes a aquellas que inicialmente condujeron a su adopción. Esto puede constituirse en una fuente de sesgo en el diseño. Por ej., un reactor que opere satisfactoriamente cuando se diseña con una capacidad cincuenta por ciento superior a la que se deduce a partir de los mejores datos cinéticos disponibles, puede conducir a la aplicación de un factor similar para todos los reactores que se proyecten subsiguientemente. Sin embargo, este procedimiento puede resultar totalmente inadecuado para diseñar un reactor en el que se vaya a efectuar otra reacción en una situación económica diferente. Esta consecuencia, bastante frecuente, se sigue del conservatismo usual en el trabajo de diseño (el cual, en última instancia, está asociado a una razón de costos).

Se ha apuntado que: "El diseñador de proceso puede sentir que su proceso es un poco más complejo que la información que él usa para dimensionar y, consecuentemente, agrega un factor de seguridad, redondeando sus cálculos hacia arriba el más próximo tamaño estandar. Si, mientras tanto, ha considerado algunas variaciones que pueden ocurrir al proceso para cambiar las tasas de flujo y ha considerado otras variaciones que puedan ocurrir con el tiempo, es posible llegar a un factor de seguridad muy alto, aún antes de que se consideren los factores de seguridad mecánicos. 8/

El efecto piramidal consiguiente - que también puede seguirse de que, para plantas de alguna complejidad, distintos diseñadores apliquen cada uno el factor de sobredimensionado a su sección particular de la planta -, puede conducir a fuertes discrepancias respecto de la capacidad contratada.

Es obvio que el diseño de un componente no puede encararse con total independencia del sistema de que formará parte. La incertidumbre puede emanar de la misma definición del problema de procesos. Por ej., puede esperarse que el factor de sobredimensionado de una unidad de separación será mayor si su efluente es el alimento de un proceso que ha demandado una inversión cuantiosa que si tan sólo conduce a una zona de almacenamiento. Una deficiencia en la capacidad se podría traducir, en un caso, en un grave disturbio mientras que, en el otro, apenas si sería apreciado. Es por ello, entre otras razones, que la ingeniería de sistemas sostiene la tesis de que la disposición de las unidades de un sistema es tan importante desde el punto de vista de su rendimiento global como las características de cada una de ellas por separado. 9/

Los ingenieros de proceso procuran alcanzar la situación más ventajosa tras errar tanto por exceso como por defecto. Las correcciones progresivamente ensayadas se van efectuando de modo intuitivo, aunque durante los últimos años se está reduciendo el ámbito de subjetividad apelándose a modelos de la teoría estadística de la decisión.

El estudio de la sensibilidad de las condiciones de diseño ante cambios en los parámetros permite evaluar los patrones de propagación de la incertidumbre. Ello puede realizarse mediante funciones de distribución de probabilidades que traducen el grado de dispersión de las observaciones que resultan del análisis de sensibilidad. 10/

---

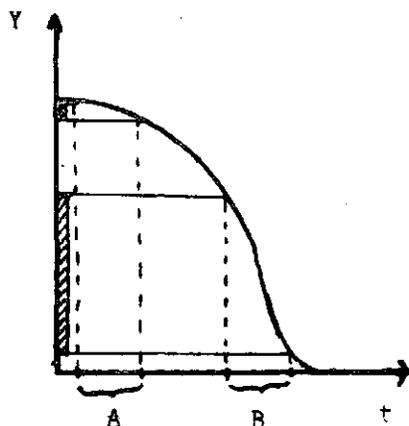
8/ Cfr. Ashley, J.A., Chemical Engineering Progress (mayo 1962).

9/ En el caso aludido en este párrafo predomina una incertidumbre de carácter económico por sobre una de carácter técnico.

10/ Por ej., en el caso de un reactor - cuya temperatura se controla mediante un circuito externo que contiene un cambiador de calor que utiliza agua fría como agente de refrigeración -, la temperatura del agua de refrigeración puede ser una variable cuyo comportamiento no se prevea con precisión. Suponiendo que las demás variables estén fijadas en valores razonables, la resolución de las ecuaciones de diseño para distintas temperaturas puede modificar el rendimiento del sistema de la siguiente manera:

En algunos casos el factor de sobredimensionado puede variar dentro de márgenes más o menos amplios sin que ello influya mayormente sobre los costos de inversión u operativos. Tal sería, por ejemplo, el caso de un reactor agitado en un intervalo que oscile entre 1. y 1.4. Esto permite al diseñador moverse dentro de apreciables márgenes de certidumbre.

De hecho, la relación entre tiempo de conocimiento de un proceso y grado de incertidumbre seguramente no es lineal. En el caso del diseño de columnas de destilación, por ej., a pesar de ser uno de los componentes más conocidos y de haber sido vastamente estudiado, subsisten apreciables márgenes de incertidumbre. El advenimiento de las computadoras digitales amplió las posibilidades de los métodos de diseño, permitiendo la aplicación de algunos de ellos al cálculo de columnas para sistemas multicomponentes. Tan sólo unos años antes esto resultaba imposible por la complejidad de los cálculos necesarios. Sin embargo, al ser eliminada esta barrera, la atención se centró en la imprecisión que adolecen los datos básicos que alimentan al computador. En el pasado la precisión de estos datos y la del método de cálculo seguido eran del mismo orden de magnitud. Actualmente la precisión numérica de la matemática utilizada excede con mucho a la correspondiente a los datos que se manejan en las ecuaciones. 11/



La ordenada mide el rendimiento del proceso (Y). La abscisa mide la temperatura del agua de refrigeración. En el intervalo A, el rendimiento del proceso no es significativamente afectado. Sí lo es, en cambio, en el intervalo B. Mientras que en el primer caso la distribución es prácticamente uniforme, en el caso B se distorsiona considerablemente. Esto apunta a dos fenómenos habituales: (i) la forma de la función de distribución que describe la incertidumbre se desfigura al propagarse ésta a través del diseño y (ii) el intervalo de incertidumbre se expande o contrae de acuerdo con la sensibilidad del diseño frente a variaciones que se producen en los parámetros.

11/ Las correlaciones de los datos de equilibrio líquido-vapor para sistemas multicomponentes que son requeridas para el diseño de columnas presentan con frecuencia errores del 5 al 10 por ciento en los sistemas químicos mejor estudiados. Las correlaciones sobre las eficacias del piso (relacionadas con la velocidad de transferencia de materia entre las fases vapor y líquido sobre cada piso) se desvían hasta un 20 por ciento de los datos a partir

A lo anterior es preciso agregar la necesaria previsión de cierta tolerancia ante situaciones imprevistas. Los diseños normalmente deben presentar una cierta flexibilidad - definida discrecionalmente - ante fallos. La teoría de la ingeniería con tolerancia ante fallos se encuentra aún en estado incipiente.

Además, un proceso debe responder a desviaciones persistentes y, quizás, imprevisibles, en cuanto a las condiciones medias (vgr. modificaciones en los costos de energía, en las condiciones meteorológicas, en la calidad de las materias primas, en la presión del vapor de agua, etc.). También para estos casos se está comenzando a aplicar enfoques tales como la teoría estocástica de las líneas de espera, que reducen el rol del factor subjetivo en los cálculos de diseño.

Para finalizar este recuento de factores técnicos de incertidumbre, no necesariamente exhaustivo, también cabe consignar el cálculo de los equipos de reserva. Hay, a este respecto, metodologías basadas en el análisis de probabilidades que coadyuvan a constreñir las incertidumbres y así a aproximarse al comportamiento óptimo respecto de equipos auxiliares o de reserva. Cuando un tren de proceso consiste en una serie de operaciones en cadena, la falla de cualquier componente en ausencia de equipos de reserva puede parar la operación. Es entonces preciso confrontar el costo de instalar equipo auxiliar con la ganancia resultante de reducir los tiempos de parada. Las variables relevantes para este análisis son aleatorias: el tiempo que transcurre hasta que se origina una falla y el que es necesario para subsanarla. Las metodologías desarrolladas permiten computar los atributos de la performance del sistema en términos de funciones de densidad de probabilidades para tiempos de falla y de reparación. Excepto en casos muy simples, nuevamente se pone de manifiesto la incertidumbre con que trabajan los ingenieros de proceso por cuanto las soluciones son tan solo aproximaciones al óptimo.

#### (ii) Forma de contratación y vínculos propietarios.

La naturaleza de las relaciones formales e informales que median entre demandantes y oferentes de servicios de ingeniería de procesos puede afectar de modo significativo la propensión al sobrediseño. Ello tiene lugar por vía de la influencia que incertidumbres respecto del posible desarrollo de conflictos de interés entre las partes pueda tener sobre los criterios de diseño.

Cuando las partes son independientes, los instrumentos de contratación definen taxativamente los márgenes de esas incertidumbres. Cuando no lo son, es preciso atender también al carácter de las relaciones informales entre las partes.

La propensión al sobrediseño será tanto menor cuanto mayor sea la inmunidad del grupo de diseño respecto de la potencial generación de conflictos de interés.

Si la entera responsabilidad por la calidad del diseño es unificada, ya sea porque el grupo de diseño es parte del conjunto económico que operará la planta,

---

de los cuales se han obtenido. Tan sólo una vez que la columna se ha construido y se encuentra en funcionamiento, se ponen de manifiesto las consecuencias derivadas de las incertidumbres que permean su diseño.

o bien porque contrata llave en mano, la incertidumbre respecto de conflictos de interés es mínima. Reducida será, por tanto, la propensión al sobrediseño (dadas otras circunstancias tales como el grado de incertidumbre técnica de diseño, ya considerada).

Por el contrario, si el cliente es un terbero independiente con sustancial poder de negociación que contrata desagregadamente la ingeniería de diseño del proceso, por un lado, y el resto de las prestaciones de ingeniería por el otro, las incertidumbres del grupo de diseño respecto de posibles conflictos de interés podrán ser vastas y ello influirá sobre una mayor propensión al sobrediseño.

Veamos estas variantes con algún mayor grado de detalle.

Los contratos llave en mano implican una delegación práctica - aunque no necesariamente - total de responsabilidad en beneficio de la firma encargada del diseño y de la realización directa o subcontratada del montaje, la construcción civil, las compras y la puesta en marcha. Estos contratos por lo general se concertan a suma fija y estipulan con minuciosidad los plazos a cumplir por el contratista a partir de un único acto administrativo. Estas circunstancias implican que la firma de ingeniería goza de una hegemonía de decisión indisputada respecto de la forma en que encare la realización del diseño y las demás fases del proyecto hasta su puesta en marcha. Normalmente, esto conduce a un diseño lo más ajustado posible a las condiciones mínimas contratadas. La posibilidad de sufrir costos en alza durante el transcurso de la prestación también puede conducir a un rápido descargo de responsabilidades y, eventualmente, a cierta propensión al sobrediseño negativo, vgr., en lo referido a equipos auxiliares, con objeto de economizar costos, sin por ello dejar de cumplir con las estipulaciones acordadas en punto a rendimiento mínimo de la planta (que, como ya se ha apuntado, se realizan sobre bases diarias). 12/

Similar es el caso cuando el cliente es parte del mismo conjunto económico al cual pertenece el plantel de diseño. En este caso, aunque los enfoques de distintos centros de decisión del conjunto podrán divergir durante la concepción del proyecto, los criterios de diseño se definirán explícitamente desde un comienzo de forma tal que sea innecesario afrontar costos extra por cobertura de incertidumbres que no sean de carácter puramente técnico - o que emanen de circunstancias ajenas al control del grupo. Las garantías que el departamento de diseño deba suministrar a unidades productivas del conjunto, vgr. una subsidiaria en el exterior, si bien no siempre ausentes, 13/ de ninguna manera serán tan estrictas ni revestirán un carácter tan compromisorio como cuando se trata de servicios prestados a terceros independientes.

Lo anterior no significa que, en el caso de una firma trasnacional cuyo propio departamento de diseño proyecte uná planta a ser operada por una subsidiaria, no pueda haber propensión al sobrediseño (más allá de la que se origina en

---

12/ Por un tratamiento más detenido respecto de los contratos llave en mano cfr. M. de Santiago y F. Sercovich (1975).

13/ Cfr., por ejemplo, Chemical Engineering Progress (1966).

incertidumbres técnicas). Dicha propensión puede ser elevada, por ej., para circunvalar limitaciones de capacidad instalada impuestas por el poder público en circunstancias de un mercado en rápido crecimiento con fuerte competencia potencial. Pero sí significa que se tratará, en gran medida, de un sobrediseño planeado. Por otra parte, dadas las demás circunstancias, cuanto mayor sea el grado de centralización de las capacidades de ingeniería en manos de la matriz, es de esperar que menor será la propensión al sobrediseño por cuanto se procurará entregar a la subsidiaria una planta lo más optimizada posible, de modo que el grado de adaptación in situ sea el mínimo necesario.

Por otra parte, cuando el plantel de diseño contrata con terceros independientes sobre bases distintas de llave en mano, usualmente se conviene un régimen de costo y costas o de precio ajustable con reconocimiento de mayores costos. En estos casos los términos compromisorios del contrato pasan a revestir un carácter más sustancial debido a la mayor probabilidad de que se generen conflictos de interés. Ello emana de una dualidad respecto de la asignación de responsabilidades y de la localización del poder de decisión con referencia a la definición de los criterios de diseño. Por un lado, el cliente evita delegar responsabilidades respecto de la selección de las fuentes de suministro de diversos insumos de ingeniería involucrados en la realización del proyecto. Esto conduce a una mayor asunción de riesgos de su parte en comparación con un contrato llave en mano. Por tanto, procura habitualmente cubrirse apelando a cláusulas de garantía que pueden incluir penalidades y premios. Pero, por el otro lado, desde el ángulo del proveedor de la ingeniería de diseño del proceso, se general una dilución de responsabilidades de la que intenta ponerse a cubierto aumentando su propensión al sobrediseño.

Sin duda, la presencia de cláusulas de garantía con fuertes penalidades por subrendimientos constituye un estímulo al sobrediseño. Este estímulo será tanto mayor cuanto más pesadas sean las penalidades impuestas. Contrario sensu, la estipulación de premios por sobrerendimientos también actuará, como mínimo, en calidad de estímulo al sobrediseño.

### (iii) Financiamiento.

Con frecuencia, la firma propietaria del proyecto puede confrontarse con una gama de diseños alternativos de procesos, algunos de los cuales pueden resultar más adecuados a la particular configuración de sus recursos (vgr. calidad de la materia prima disponible o perfil de pericia técnica requerida), que otros. Si bien, bajo condiciones ideales, la opción recaería sobre el proceso más adecuado, de hecho el proceso decisional no es tan simple, pudiendo verse distorsionado por restricciones de carácter financiero. Examinemos un caso.

Se trata de un proyecto para la realización de una planta de lubricantes. El propietario del proyecto - firma estatal -, de acuerdo al procedimiento habitual, llamó a una licitación por el proceso y la ingeniería básica, por un lado, y por la ingeniería de detalle, el montaje y la construcción civil, por el otro.

Se sometieron un número de ofertas para la primera licitación, entre las cuales sólo dos se consideraron eligibles. Una de ellas se ajustaba en un ciento por ciento a las condiciones de la licitación. La otra era pecuniariamente más ventajosa, pero venía unida a un crédito atado a un diseño bueno pero adecuado a un corte de crudo distinto al disponible. Se trataba a una "planta de carpeta".

Veamos sucintamente cuales son las características principales del proceso. La planta separa material asfáltico, aromáticos, parafinas sólidas y otras impurezas (azufre, etc.). Por diseño, el bloque de desparafinación estaba subdimensionado, puesto que el corte local era más rico en parafinas que el tomado como base de referencia para el diseño propuesto - un corte de Kuwait -, en tanto que el de desaromatización resultaba sobredimensionado, por cuanto el corte local era menos rico en aromáticos que el de referencia.

Se procede entonces a negociar, dadas restricciones financieras que invitaban a acogerse a los términos de financiamiento propuestos en esta segunda oferta.

Así, se arriba a una solución ecléctica: se acordó revisar el diseño en cuestión de modo de reducir el margen de subdimensionado del bloque de desparafinación y el margen de sobredimensionado del bloque de desaromatización - sin eliminarlos.

La financiación condicionada incidió, por tanto, fuertemente sobre los criterios de selección del diseño. Como saldo de una amplia experiencia operativa, se han llegado a identificar en la planta seis distintos cortes de crudo localmente disponibles para los cuales la planta en su conjunto resultaba subdimensionada, en el mejor de los casos, en un 40 por ciento. La mayor parte de los esfuerzos de ingeniería de planta posteriores a la puesta en marcha estuvieron dirigidos a la ruptura de los consiguientes cuellos de botella.

(iv) Competencia entre - y posición negociadora de - oferentes.

Dadas las demás circunstancias, cabe esperar que cuanto mayor sea la intensidad de la competencia entre firmas de ingeniería, mayor será la presión que estas confronten para optimizar sus diseños, y así, para presentar ofertas más económicas y técnicamente ajustadas. Esto podrá expresarse en una baja propensión al sobrediseño o en una acentuación de la propensión al subdiseño.

Usualmente, empero, la cantidad de restricciones con que se confronta quien selecciona un proceso (calidad de materias primas disponibles, precio relativo de insumos y materias primas, especificación mínima del producto, escala, etc.) es tal que no puede elegirse sino entre muy pocas alternativas de proceso. Al mismo tiempo, difícilmente exista más de una firma de ingeniería que ofrezca cada una de esas alternativas. <sup>14/</sup> En el caso más frecuente, la firma de ingeniería que ofrece una de ellas se encuentra, por tanto, en posición negociadora relativamente favorable. De lo cual se desprende que la presión negociadora en favor de la optimización del diseño no podrá ser muy fuerte. Y, cuanto menor sea esa presión, mayor será la propensión al sobrediseño positivo.

(v) Expectativas de la firma propietaria del Proyecto.

Existen varias vías por medio de las cuales las expectativas del cliente pueden afectar la propensión al sobrediseño.

---

<sup>14/</sup> Cfr. Sercovich, F.C., op. cit.

La firma propietaria del proyecto puede gozar de una posición monopólica y su principal necesidad para conservar esa posición (y las ventajas que de ella se derivan) puede consistir en su capacidad de satisfacer continuamente una demanda en sostenida expansión. Con ese objeto, y dentro de los límites permisibles por el proceso y la disponibilidad inmediata de fondos, puede existir un "diseño de expansión" (planeado) con objeto de anticiparse a futuros aumentos de la producción sin necesidad de incurrir en ingentes inversiones adicionales en activo fijo durante el periodo en el cual la capacidad efectiva alcance a satisfacer la demanda y hasta tanto no se justifique crear nueva capacidad. El subsiguiente margen de sobrediseño, dentro de los límites técnica y económicamente factibles, será tanto mayor cuanto mayor sea la diferencia prevista en el nivel de demanda entre los primeros años de operación y los subsiguientes. Desde luego, cuanto mayor sea la modularidad del proceso o, dicho de otro modo, cuanto menor sea la elasticidad del costo total de la inversión a su escala, menor será la necesidad de realizar ese sobrediseño planeado por cuanto las características propias del proceso permitirán un ajuste más conveniente de la capacidad al curso de la demanda. 15/

Alternativamente, puede ocurrir que se aguarde un crecimiento diferencial de la demanda y por distintos tipos de productos de modo que se desee que la planta esté en condiciones de ir cambiando la mezcla de productos a través del tiempo. En este caso, esa flexibilidad requerida también podrá satisfacerse mediante ciertos márgenes de sobrediseño (planeado). Un caso similar puede referirse a cambios previstos en la calidad de un mismo producto a través del tiempo. Por ejemplo, para mantener y consolidar una posición oligopólica, la firma cliente puede requerir ir elevando los estándares de calidad con objeto de controlar aquellos segmentos de mercado que resulten más rentables y protegidos contra la competencia potencial. Esto puede originar la exigencia de un diseño flexible en términos de los rangos de calidad del producto.

Similares circunstancias que conduzcan a demandar ciertos atributos de flexibilidad al proceso pueden referirse a incertidumbres respecto del acceso a y precios de materias primas e insumos intermedios de diversas especificaciones o repuestos, de posibles conflictos laborales, o de la obtención de fondos de inversión.

Bajo el influjo de la influencia de estos factores, se adoptarán - o se demandará la adopción de - criterios de diseño que oscilen, según el caso, entre los siguientes dos extremos: diseñar para el mínimo y romper los cuellos de botella durante la operación, o bien, sobrediseñar inicialmente de modo de llevar a un mínimo las incertidumbres por ajustes futuros.

(vi) Capacidad técnica de la firma propietaria del Proyecto.

El nivel del conocimiento que domine la firma propietaria del proyecto respecto de las variables técnico-económicas relativas al proyecto puede ejercer una clara influencia sobre la adecuabilidad del diseño elegido y, así, sobre el margen de sobrediseño que en definitiva resulte. Esto puede operarse de dos maneras, una se refiere a la etapa previa a la puesta en marcha; la otra a la etapa operativa. Veamos las dos en turno.

15/ En otros términos, a menores economías de escala, menor significación del sobrediseño planeado.

Si el nivel de conocimiento de la firma cliente es muy pobre, podrá llegar a contratar un "diseño de carpeta" que resulte sobrediseñado (positiva o negativamente) en función de la disponibilidad y precios de los insumos locales. En cambio, si la capacidad técnica del cliente es sustancial, podrá exigir una adecuación de los criterios de diseño tal que restrinja al máximo tal posibilidad o que la modele con arreglo a sus propias expectativas. El cliente, en función de ese nivel de conocimiento que disponga, podrá o no imponer ciertos requisitos respecto de la cantidad mínima o máxima de equipos de reserva, de las condiciones de mantenimiento y de control, de la flexibilidad ante cambios en condiciones de suministro de insumos, de capacidades relativas de componentes intermedios, de integración interoperacional, de recuperación de subproductos, etc.

Por otra parte, el nivel de conocimiento de los cuadros técnicos de la firma propietaria del proyecto influirá sobre la media y eficacia con que se eviten las limitaciones del subdiseño o que se exploten las posibilidades del sobrediseño. Es de esperar que ambos tipos de conocimiento, el de la etapa preoperativa y el de la operativa, sean correlativos, aunque puede haber discontinuidades entre ambas. Vgr., si se recurre a insumos de ingeniería especializados que coadyuvan en una u otra etapa a compensar insuficiencias del elenco técnico de la firma cliente.

IV.3. Interacción entre las variables explicativas de la propensión al sobrediseño. La función de sobrediseño en su conjunto.

El análisis de la sección anterior brinda ciertas bases para el estudio sistemático ex-ante de la propensión al sobrediseño que se plasma en un proyecto concreto. Formalmente considerando, el margen de sobrediseño absoluto (I 1) puede ser expresado como una función de los valores que asuman las seis variables analizadas.

Acotando el rango de variabilidad y atributos de las variables explicativas a un atributo y dos valores, hagamos:

- (i) Incertidumbres técnicas de diseño ( $X_{1,j}$ )
  - (i.i) reducidas  $x_{1,1}$
  - (i.ii) elevadas  $x_{1,2}$
- (ii) Forma de contratación y vínculos propietarios ( $X_{2,j}$ )
  - (ii.i) llave en mano  $x_{2,1}$
  - (ii.ii)desagregada  $x_{2,2}$
- (iii) Financiamiento ( $X_{3,j}$ )
  - (iii.i) restrictivo  $x_{3,1}$
  - (iii.ii)no restrictivo  $x_{3,2}$

- (iv) Competencia entre oferentes ( $X_{4,j}$ )
  - (iv.i) elevada  $x_{4,1}$
  - (iv.ii) reducida  $x_{4,2}$
- (v) Incertidumbre del cliente ( $X_{5,j}$ )
  - (v.i) reducida expansión  $x_{5,1}$
  - (v.ii) elevada expansión  $x_{5,2}$
- (vi) Capacidad técnica del cliente ( $X_{6,j}$ )
  - (vi.i) elevada  $x_{6,1}$
  - (vi.ii) reducida  $x_{6,2}$

Tendremos entonces al margen de sobrediseño explicado mediante una función de las variables  $x_{ij}$

$$\Phi = f(x_{ij}) \quad (1)$$

Para analizar la naturaleza de la función (1), se puede elaborar un cuadro se exponga el signo del efecto de ambos valores posibles de cada variable sobre el margen de sobrediseño junto al signo que corresponde a todas las demás variables. De este modo sabremos cuándo los efectos combinados de cada par de variables explicativas se refuerzan (++) o contrarrestan {+-} o (-+). 16/

16/ Relaciones entre los efectos de variaciones de Pares de Variables Explicativas de la propensión al sobrediseño.

	$x_{i1}$	$x_{i2}$
$x_{i1}$	--	-+
$x_{i2}$	+-	++

Este cuadro debe leerse de la siguiente manera. Si, por ejemplo, las incertidumbres técnicas de diseño son reducidas ( $x_{1,1}$ ), el efecto sobre la propensión al sobrediseño será negativo (-). Y, si eso se combina con una contratación sobre bases llave en mano ( $x_{2,1}$ ), cuyo efecto sobre la propensión al sobrediseño también será negativo (-), los dos efectos se reforzarán, lo cual se denota por (--). Si las incertidumbres técnicas de diseño fuesen elevadas, y ello se combina

De lo anterior es obvio que la función de sobrediseño será máxima cuando las variables explicativas asuman los valores  $x_{i2}$  y mínima cuando asuman los valores  $x_{i1}$ . El valor máximo y mínimo dependerá de las ponderaciones que se asignen a las variables. Los valores intermedios entre el máximo y el mínimo dependerá de las ponderaciones de las variables y de la combinación de los signos de sus respectivos efectos sobre la propensión al sobrediseño.

Este modelo puede testearse para una muestra de manera de calcular los coeficientes parciales y totales de asociación entre el margen de sobrediseño, por un lado, y las variables explicativas, por el otro.

Ahora bien: una vez encontrados los valores de dichas asociaciones es preciso abordar el problema desde el punto de vista de la incidencia o significación de los distintos márgenes de sobrediseño absoluto sobre el beneficio (privado y social) del proyecto. Así, el beneficio efectivo será distinto (mayor o menor) sin sobrediseño que con él, en función del margen de sobrediseño. Dicha diferencia dependerá de la sensibilidad de la rentabilidad frente al margen de sobrediseño. Esto puede expresarse formalmente de la siguiente manera:

$$B_e = B(\phi) - B \quad (2)$$

donde  $B_e$  es el beneficio efectivo,  $B$  el beneficio sin sobrediseño y  $B(\phi)$  el beneficio con sobrediseño. Si  $B_e$  es positivo, conviene sobrediseñar; si es negativo, no conviene. En el capítulo VI se estudiarán las condiciones para que  $B_e$  sea positivo y máximo. Pero antes, como paso previo a ese examen en el contexto del análisis de las relaciones entre condiciones iniciales de diseño y aprendizaje en planta, trataremos en el capítulo V el tópico del dimensionamiento de plantas.

---

con una contratación desagregada, ambos efectos sobre la propensión al sobrediseño serán positivos y, por tanto, se reforzarán (++). En cambio, si las incertidumbres técnicas de diseño son reducidas y la contratación es desagregada o si las incertidumbres técnicas son elevadas y la contratación es sobre bases llave en mano, los respectivos efectos sobre la propensión al sobrediseño se contrarrestarán (-+) y (+-), respectivamente. El mismo tipo de razonamiento se realiza para cada par de variables independientes que se considere.

## V. DIMENSIONAMIENTO DE PLANTAS

Procederemos en este capítulo a examinar los criterios de dimensionamiento de plantas de procesos. Se depositará especial énfasis sobre el tipo de decisiones con que se confrontan los empresarios de países en desarrollo.

### V.1. Funciones de costo según procesos y escalas

Para una demanda y precios dados - para un dado ingreso esperado - durante el período de planeamiento, la dimensión económicamente óptima será aquella que minimiza el costo total de producción durante ese período; esto es, aquella para la cual se obtiene un máximo beneficio en valores descontados a la tasa de interés apropiada.

Se parte, por tanto, de un determinado nivel de demanda y de una estimación de su crecimiento futuro. Las incertidumbres respecto de la tasa de crecimiento futuro influyen sustancialmente respecto de los criterios de decisión. Pueden adoptarse valoraciones "optimistas" o "pesimistas" al respecto. También puede optarse por un enfoque probabilístico que admita cierta varianza en las tasas de crecimiento previstas. Si el empresario es un oligopolista, su "demanda" podrá referirse a cierto objetivo de participación en el mercado.

Una vez así proyectado el curso esperado de la demanda, y de acuerdo con la disponibilidad local de recursos (en especial la calidad de las materias primas); la estructura de las necesidades de productos a ofrecer en el mercado, y los costos relativos de factores, se procede a considerar la selección del proceso a adoptar (dadas las restricciones presupuestarias).

Por lo general, para cada estructura de necesidades de producción hay dos o más procesos, o variantes de procesos, disponibles en el mercado mundial. Así, por ej. el hidrógeno requerido para la síntesis del amoníaco puede obtenerse por reformación de gas natural y de nafta, o por recuperación de gas de refinerías o por otros medios. Asimismo, puede optarse por tecnologías de recuperación que operan a bajas presiones (con mayores costos relativos de refrigeración), o bien, por tecnologías que operan a altas presiones (con mayores costos relativos de compresión).

Ciertamente, el número de procesos disponibles "por catálogo" puede verse considerablemente reducido, no sólo por razones tecnológicas (tipo especial de mezcla de insumos y productos que se desee, flexibilidad del proceso ante cambios en esas mezclas, etc.), sino también económicas (costo relativo de gases de refinería, prácticas comerciales restrictivas de proveedores de tecnología, etc.).

Habitualmente la elección del proceso no es independiente de la elección de la escala de planta. Hay procesos apropiados para escalas mayores y otros apropiados para escalas menores. Por ej., para volúmenes de producción inferiores a las 600 t/d. de amoníaco resulta conveniente el empleo de tecnologías de reformación de bajas presiones con compresores recíprocos; en tanto que, para capacidades superiores a las 600 t/d. resulta más ventajoso emplear tecnologías de

reformación de alta presión en plantas de tren único con compresores centrífugos. La relación entre el costo de inversión (u operativo) y la capacidad a que se opere una determinada tecnología se estima a través del denominado "coeficiente de sensibilidad a escala" o de la así denominada "regla de los seis décimos". 1/ Pero antes de adentrarnos en ello, es preciso especificar, primero, qué entendemos por "capacidad" y, segundo, cuáles son las funciones de costos tenemos en cuenta cuando hacemos referencia a la sensibilidad a escala de una dada tecnología.

En realidad, el concepto de capacidad es más bien discrecional. Admite varias acepciones, entre las cuales conviene distinguir dos. Una consiste en considerar como capacidad de una planta aquélla que puede alcanzar en el corto plazo, una vez entrada en régimen normal de operación, sin ningún tipo de modificaciones. La otra se refiere a la capacidad óptima que la planta pueda alcanzar tomando como término de referencia su proceso principal (y suponiendo que los de más procesos y subprocesos se redimensionan en la medida necesaria). 2/

Consideremos el ejemplo ya aludido del transporte de gas por cañería. La planta, en este caso simple, consiste de dos subprocesos que admiten distintas combinaciones alternativas: la comprensión del gas en una estación de bombeo y su expansión a medida que fluye a través de un gasoducto de diámetro dado. El flujo está gobernado por dos fuerzas opuestas: la presión ejercida por las bombas y la resistencia friccional de las paredes del gasoducto. La combinación de los procesos es tal que permite aumentar la cantidad de gas transportado aumentando el número de compresores para un mismo gasoducto. Este último es un factor indivisible que determina el tamaño económico último de la planta (mínimos costos medios). El otro proceso, bombeo, requiere varias unidades de equipo y su indivisibilidad no es importante. En razón de que los costos del gasoducto superan sustancialmente en importancia a los costos de bombeo, y de que el gasoducto mismo es el elemento indivisible (en tanto que el proceso de bombeo puede ser expandido modularmente), la capacidad de bombeo puede optimizarse en función del diámetro de la línea de manera de alcanzarse el mínimo costo unitario correspondiente a ese diámetro.

Ahora bien; según la primera definición de capacidad, se tomará únicamente en cuenta la producción alcanzable para un diámetro de cañería y una capacidad de bombeo dados, una vez que la planta haya alcanzado su régimen normal de operación. En cambio, con arreglo al segundo criterio, la capacidad vendrá dada por la que corresponde a una optimización del proceso de bombeo en relación al diámetro de la línea. La diferencia, de acuerdo con que se aplique uno y otro criterio, puede llegar a ser bastante sustancial. Por ej., una vez establecido el diámetro del gasoducto, la capacidad de transporte que en definitiva se alcance puede oscilar entre un 200 y un 300 por ciento por encima de la capacidad inicial mediante sucesivos aumentos del equipo de bombeo.

En el caso que se cuente con un elevado conocimiento de la tecnología - y dadas otras determinaciones del diseño examinadas en el cap. anterior -, la

---

1/ Ver Chilton, C.H. (1950).

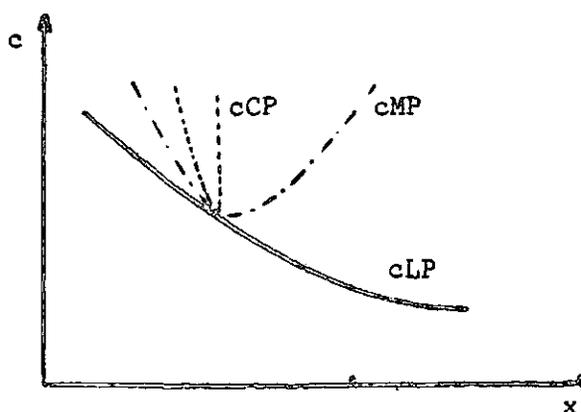
2/ Los economistas utilizan, salvo excepciones, el segundo criterio. Ver, por ejemplo, Manne, A.S. (1961).

diferencia entre capacidad inicial (nominal) y última (efectiva máxima) resulta de un sobrediseño planeado en base al criterio de la "óptima sobrecapacidad". Nótese que la sobrecapacidad no se refiere al proceso en su conjunto (en cuyo caso sería sobredimensionamiento de planta) sino a una determinada operación unitaria del proceso: esto es, se trata de un desequilibrio (sobrediseño), en este caso deliberado, entre las capacidades de las distintas operaciones unitarias. Este tipo de sobrediseño es muy habitual en industrias que cuentan con operaciones unitarias muy indivisibles que operan en combinación con otras operaciones unitarias relativamente modulares como las industrias química, petroquímica, siderurgia, energía; esto es, actividades productivas de proceso continuo, elevado coeficiente capital/producto y productos homogéneos y estandarizados.

Si se dispone de una función de producción ingenieril del proceso y, por tanto, se pueden determinar algorítmicamente las funciones de costos y sus óptimos, es posible definir tres de esas funciones.

La función de costos medios de corto plazo es la relativa a costos unitarios que resultan de operar a distintos niveles de capacidad ociosa para un dado equilibrio interoperacional de la planta. La función de costos medios de plazo intermedio (o función "intertemporal" de costos) se refiere a los costos unitarios derivados de distintos equilibrios interoperacionales con que pueda operar la planta, es decir, distintos niveles de adecuación de las operaciones unitarias que el proceso comprende a la operación unitaria menos limitativa. Finalmente la función de costos medios a largo plazo está constituida por los costos mínimos para combinaciones óptimas de todas las variables (diámetro de línea y capacidad de compresión, en el ejemplo aludido). La curva de costos medios de largo plazo está constituida, por tanto, por la envolvente de todos los puntos de costo medio para los óptimos correspondientes a las distintas escalas con que se opere el proceso. Gráficamente, la forma de las tres curvas es como sigue:

Gráfico 1



La ordenada mide costos unitarios y la abscisa capacidad.

Un supuesto subyacente en el análisis de Chenery es que el óptimo para cada escala es conocido por vía analítica a priori y que, por tanto, no hay costos asociados a su búsqueda. Nosotros partimos de que, en la generalidad de los casos, ese óptimo no es conocido con antelación debido a incertidumbres técnicas, diversos comportamientos del mercado, cambios en la calidad de los insumos, etc. Por tanto, hay costos y tiempo involucrados en su búsqueda. La derivación de funciones de producción ingenieriles se ha circunscripto hasta el presente a un reducido número de procesos (transporte de fluidos por cañerías, electrólisis de cloro y soda cáustica y, parcialmente, craqueo catalítico de gasoil y operación de máquinas-herramientas). 3/ Esto es, particularmente a procesos donde: (i) se trata de reducidas operaciones simples en secuencias; (ii) los materiales procesados son homogéneos y (iii) las operaciones son estandarizadas. En estos casos pueden llegar a deducirse los principios físicos que gobiernan al proceso a partir de las relaciones físicas o químicas relevantes. En procesos más complejos, empero, se confrontan incertidumbres que hacen preciso un necesario proceso de aprendizaje en la búsqueda del óptimo.

Aún cuando, en un determinado momento, la función de producción ingenieril y sus respectivos algoritmos permitan calcular el óptimo, pueden resurgir incertidumbres a raíz del cambio técnico. Por ej., si bien la función de producción ingenieril del transporte de fluido por cañería se consideraba bien conocida hacia principios de 1952 de hecho, a la luz de la experiencia posterior, pudo comprobarse que las cañerías de diámetro reducido construidas a partir de los diseños de 1952 empleaban un caño de excesivo grosor, con el consiguiente mayor costo inicial que el necesario. Las cañerías de mayores diámetros, con arreglo a las especificaciones de esa época, por su parte, habrían sufrido excesivos riesgos de resultar dañadas y, consiguientemente, gastos extraordinarios tanto durante la construcción como en la operación. 4/

A raíz de lo anterior, la función de costos mínimos a largo plazo está condicionada por el nivel de conocimientos alcanzado en un determinado momento. Mediante el aprendizaje tecnológico, la curva respectiva puede llegar a trasladarse hacia abajo, expresando crecientes aproximaciones a un óptimo superior. Antes de ahondar en cuanto a las consecuencias de este punto, es conveniente especificar mejor la naturaleza de esa curva.

## V.2. La sensibilidad a escala.

La forma de la curva de costos medios mínimos a largo plazo viene definida por la sensibilidad a escala del proceso. El coeficiente de sensibilidad a escala es una expresión estilizada que permite estimar cuál será el costo de inversión u operativo de un proceso para plantas de distinta dimensión que lo utilicen. Así, si se conoce cuál es el costo de inversión para una capacidad dada y el coeficiente de sensibilidad a escala del proceso, se podrá calcular cuál será el

---

3/ Ver Chenery, H.B. (1949); Cookenboo, L. (1955); Campbell, C.A. (1958); Eng, L.L.C. (1960) y Boot, G.K. (1964).

4/ Cfr. Pearl, D.S. y Enos, J.L. (1975).

costo de inversión para una escala mayor o menor, a través de la siguiente expresión:

$$I = I_b (C/C_b)^k$$

donde C e I expresan capacidad e inversión, el subíndice b denota la capacidad e inversión de referencia y el exponente k el coeficiente de sensibilidad a escala. Por detrás de este coeficiente hay ciertos supuestos que conviene tener presentes.

En primer lugar, se supone que el proceso es esencialmente el mismo para las distintas escalas de planta. Esto implica que será posible, aunque no realista, calcular el costo de inversión de un proceso para una escala demasiado distinta de las de hecho existentes. Por tanto, la curva que denota cómo varían los costos de inversión (u operativos) por unidad producida según la escala de producción, será relevante para cierto intervalo de escalas en torno de la escala o escalas que se tomen como base para el cálculo.

En segundo término, dado el rango de validez de las estimaciones, habrá distintos márgenes de dispersión entre ellos y las observaciones o eventos reales. La magnitud de esa dispersión podrá verse influida por la habilidad de quienes negocian la compra de los equipos, las condiciones específicas de financiamiento, la localización de la planta, etc. En otros términos, la ecuación, en lugar de describirnos una curva nos está describiendo una franja en derredor de esa curva.

En tercer término, es importante observar que el coeficiente de sensibilidad a escala para un proceso dado es fruto resultante de la agregación de coeficientes parciales correspondientes a las distintas secciones de la planta. En el cuadro de la página siguiente se incluyen los coeficientes de sensibilidad a escala para un número de elementos de equipo de proceso, indicándose el tamaño de referencia y el campo de validez de la estimación.

Los costos de la mayor parte de los equipos individuales, como tanques, bombas, filtros, etc., varían exponencialmente con la capacidad, oscilando el valor de k entre .3 y .9. Cuando la capacidad de la planta aumenta, uno o algunos de los componentes principales puede alcanzar su tamaño comercial máximo, a partir de lo cual su contribución a los costos totales de la planta será directamente proporcional a su capacidad. Empero, los restantes costos, para tuberías, tendido eléctrico, cimientos, vías de comunicación, edificios, etc., continuarán aumentando menos que proporcionalmente con aquélla. Así, es posible que el costo total de la planta varíe como promedio con la potencia .6 de la capacidad para un amplio intervalo de valores esta, para distintos procesos.

Cuanto mayor sea la participación de los componentes con más elevados coeficientes de escala en el costo total de la planta, mayor será el grado de modularidad de esta última. La dimensión de esos componentes no presenta grandes problemas de indivisibilidad y puede irse ajustando al curso de la capacidad de la planta sin generar, per se, mayores desequilibrios interoperacionales. La posibilidad técnica de sobrediseño será entonces tanto mayor cuanto mayor sea la varianza de los coeficientes de escala entre los distintos componentes de la

Cuadro 3. Coeficientes típicos para el costo de ítems de equipo

Aparato	Tamaño de referencia	Costo de referencia (dls 1961)	Intervalo relevante (en unidades del tamaño de referencia)	k
Sopladores				
.1 atm.	2m <sup>3</sup> /min	360	2-40	0,46
.5 atm.	40	6900	40-170	0,35
Caldera para aprovechar calor residual	500 kg vapor/h 2000 kg/h	2800 9800	500-200 2000-10000	0,90 0,67
Centrífuga				
Acero al carbono	cesta de 1 m	28700	1-1,6	
Acero inoxidable	1 m	43000	1-1,6	
Compresor de aire acondicionado por turbina de vapor	240 HP	80000	240-2000	0,29
Cinta transportadora	18 m <sup>2</sup>	7000	18-110	0,81
Cristalizador (tipo crecimiento)	10 t/d	22100	10-1000	0,63
Secadores				
Cilindro (atm)	5 m <sup>2</sup>	11600	5-35	0,63
Cilindro (vacío)	3 m <sup>2</sup>	31000	3-18	0,86
Tornillo sin fin	1,5 m <sup>2</sup>	6400	1,5-25	0,53
Evaporadores				
Película descendente	0,3 m <sup>2</sup> 0,8 m <sup>2</sup> 3 m <sup>2</sup> 6 m <sup>2</sup>	9200 11200 17900 26300	0,3-0,8 0,8-3 3-6 6-15	0,24 0,36 0,55 0,67
Filtro prensa	1 m <sup>2</sup>	800	1-25	0,85
Cambiadores de calor				
Carcasa y tubos	5 m <sup>2</sup>	1350	5-25	0,48
Tubo con aletas	65 m <sup>2</sup>	5400	65-300	0,58
Placas	1,5 m <sup>2</sup>	45	1,5-4	0,52
Calderín	35 m <sup>2</sup>	4070	35-50	0,25
Caldera (encamisada)				
Fundición	1 m <sup>3</sup>	5800	1-3	0,24
Vitrificada	3 m <sup>3</sup>	9900	3-10	0,65
Mezclador (hélice marina)	15 HP	3900	15-25	0,19
Recipiente a presión no calentado				
Aceros al carbono	1500 Kg 15000 Kg	1060 4830	1500-3000 15000-45000	0,60 0,80
Recubiertos de caucho	3 m <sup>3</sup>	1730	3-5	0,54
Bombas centrífugas				
Aleación	10 HP 25 HP	1300 2480	10-25 25-100	0,68 0,86
Reactores				
Vitrificado	200 litros	1000	200-1200	0,41
Vitrificado y encamisado	1 m <sup>3</sup>	2100	1-9	0,69
Unidades de refrigeración				
4° C	7 ton	4200	7-4000	0,72
-7° C	7 ton	5100	7-4000	0,72
-18° C	7 ton	7000	7-4000	0,72
-30° C	7 ton	9600	7-4000	0,72
Tanques				
Acero al carbono	1200 litros	240	1200-5000	0,66
Acero inoxidable	600 litros	790	600-2000	0,69

Fuente: H.C. Bauman (1964).

planta. 5/

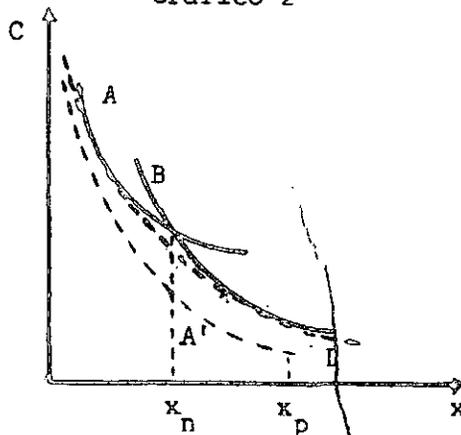
En realidad, la ecuación de la pág. anterior supone que el proceso no habrá de sufrir ninguna modificación significativa de acuerdo a las distintas dimensiones de planta para las cuales se calcule el costo de inversión. Sin embargo, como se ha señalado más arriba, dicho supuesto implica ciertas cotas al rango de validez de las estimaciones. Por ej., en el caso de plantas de amoníaco que utilizan compresores centrífugos, cuando se intenta producir menos de 600 t/d., el costo mínimo unitario puede resultar mayor que si se utilizaran compresores recíprocos, pero resultará menor si se escala la planta para producir más de esa cifra. Esto implica que las curvas de costos mínimos de largo plazo se cruzarán. El calcular el costo unitario de una planta de amoníaco con compresores centrífugos vgr. para una escala de 300 t/d. resultaría un ejercicio meramente teórico, sólo útil para mostrar que, para dicho orden de capacidades, resulta más conveniente emplear compresores recíprocos.

El ejemplo anterior señala el hecho ya subrayado de que hay tecnologías más económicas para escalas reducidas y otras alternativas, más económicas para escalas mayores. En otros términos, a medida que crece la capacidad deseada de planta llega un momento en que resulta conveniente sustituir un proceso por otro. Este es un caso habitual en plantas de amoníaco, unidades normales de refinación (cracking, reforming, platforming), cloro-soda y otras, donde puede optarse por distintas tecnologías según rangos de capacidad.

Debe observarse que es muy difícil que, denominando A al proceso más económico para escalas pequeñas y B al proceso más económico para escalas grandes, haya algún punto de la curva de costos para A que resulte más económico para escalas pequeñas de lo que B lo es para escalas grandes. Este es particularmente el caso en procesos continuos donde la relación capital por hombre ocupado crece mucho con la escala de planta. El supuesto de que es posible saltar esa dificultad ha dado lugar a algunas decisiones erróneas en la concepción de proyectos (se cita, en este sentido, el caso de la concepción inicial del proyecto de etano de Gas del Estado en General Cerri).

Ilustremos lo anterior con el siguiente gráfico.

Gráfico 2



5/ Por ser esto así, y dados los grados de libertad que goce el diseñador

El caso habitual es que, a escalas menores que  $x_n$ , el proceso A sea más económico mientras que, para escalas mayores a  $x$ , el proceso B pase a ser más económico (tanto en términos de costos unitarios de inversión como de costos operativos). Pero el caso de A' en relación a B, donde A' es más económico que B para cualquier escala es altamente improbable, sino imposible. 6/

Es frecuente en los países en desarrollo que, cuando se decide la dimensión de una planta, no se considere las alternativas según distintos procesos (vgr. A y B), sino que se tienda a adoptar aquella dimensión de planta del proceso con mayor potencial de economías de escala (B), correspondiente al punto donde el proceso se torna relativamente insensible a aumentos de escala. En otros términos, aquella escala para la cual ya se han alcanzado las mayores economías y sólo restan por explotar ventajas relativamente pequeñas por aumentos adicionales de escala. En el gráfico sería un punto tal como  $x_p$ . Este punto es lo que actualmente se denomina "escala mínima óptima". 7/

Pero aún cuando se adopte un enfoque más comprehensivo, esto es, teniendo en cuenta alternativas tales como A y B, hay razones para pensar que ello no sería suficiente. Esto puede ocurrir por el hecho de que no se tenga presente el potencial de mejora relativa de ambos procesos. Esto es importante tanto desde el punto de vista de la firma de procesos que adopta la decisión, como de la influencia que esta decisión pueda tener desde el ángulo del desarrollo de la capacidad de ingeniería de diseño de procesos.

Como ya se apuntó, el conocimiento relativo a los óptimos económicos de los procesos es en todo momento insuficiente por estar permeado por incertidumbres que tan sólo en el futuro podrán ser devaladas. Esto es particularmente así respecto de procesos apropiados para escalas relativamente reducidas, por cuanto aquellos más ventajosos para escalas grandes son más intensamente evaluados y, consiguientemente, gozan de un mayor grado de optimización en la misma fase de diseño. En varios casos (amoníaco, etileno, etc.) ya se han alcanzado los umbrales de la escala máxima, pero no puede afirmarse lo propio respecto de las escalas mínimas. En otros términos, es dable suponer que, en la medida que los diseños correspondientes a procesos para escalas reducidas estén menos optimizados que los relativos a escalas grandes, los primeros gocen de un mayor potencial de mejora. Y que este potencial, dado por el grado relativo de optimización del diseño inicial, se vaya reduciendo a medida que se avanza en el escalamiento.

Desde un punto de vista histórico, lo anterior puede ilustrarse por medio del siguiente ejemplo.

sería posible afectar el coeficiente de escala global de la planta a través de cambios en la ponderación de los coeficientes de cada sección de la planta (mediante modificaciones en el equilibrio interplanta), o bien, de cambios en las ponderaciones de los coeficientes de items particulares de equipo.

6/ La curva D, envolvente de A y B, expresa la mejor ecuación teórica de los costos unitarios en función de la capacidad contemplando ambas tecnologías. Empero, su significación práctica es escasa.

7/ Este sesgo en favor de procesos aptos para escalas grandes está influido, entre otras cosas, por las firmas internacionales de ingeniería. Cfr. Petrosur (1973).

Enos 8/ distingue dos etapas en la vida de un proceso. Una, que culmina en la introducción del proceso a escala comercial. La segunda se refiere al período posterior a la introducción. Enos compara el progreso técnico relativo que un proceso conlleva según se considere el momento de su introducción o bien el momento en que el proceso es sustituido por uno nuevo.

El proceso Burton se introdujo a escala comercial en 1913. En los años que medían entre esa fecha y la de introducción del proceso Tube & Tank (1922), la tasa de aumento de la productividad de la mano de obra aumentó a razón del 18 por ciento anual en promedio. Cuando se introdujo el proceso Tube & Tank, este comenzó a operar a un nivel de rendimiento laboral inferior al que se había alcanzado con el proceso Burton, si bien posteriormente lo superó. Exactamente lo mismo aconteció con el proceso Hourdry. Cuando este se introduce (1938), la productividad laboral es inferior a la que se había alcanzado con el proceso Tube & Tank (esta última había crecido a razón del 7 por ciento anual).

De la anterior evidencia se pueden inferir varias cosas. Cuando se opta por un proceso, no basta con verificar cuál es su economicidad relativa en el momento de su elección (criterio estático), sino que es preciso también estimar su potencial de mejora (criterio dinámico). Vgr., si una empresa hubiese tenido que decidir por cuál proceso optar en el año 1922, recién introducido el proceso Tube & Tank, el criterio estático la hubiese guiado a optar por el más antiguo proceso Burton que, en ese momento había alcanzado una productividad laboral superior (estamos utilizando la productividad laboral como una 'proxy' de la economicidad del proceso). Sin embargo, el criterio dinámico la hubiese conducido a optar por el reciente proceso Tube & Tank. A la vuelta de unos pocos años, su situación competitiva se hubiese visto sumamente comprometida en el primer caso, mientras que en el segundo su posición en el mercado sería técnicamente sólida. 9/

Pero el aspecto que más nos interesa resaltar a partir de la evidencia de Enos se refiere a los rendimientos decrecientes que se verifican en el curso de la vida de los procesos en punto a economicidad. Esto es cierto tanto en el caso de un proceso particular como cuando se comparan procesos sucesivos, aunque puede haber excepciones. Enos muestra que los aumentos de productividad que se fueron logrando a partir de la primera introducción comercial de cada proceso fueron teniendo tasas menores a través del tiempo. Así, los aumentos de productividad anual promedio de la mano de obra para los procesos Burton, Tube & Tank y Cracking Catalítico Fluído fueron del 18, 7 y 5 por ciento respectivamente; asimismo, las disminuciones de requerimientos por unidad de producción fueron del 4, 3 y 2 por ciento y del 6, 2 y 8 por ciento para consumos de materias primas y de combustibles para los tres sucesivos procesos, respectivamente. Como puede observarse, hay un comportamiento regular hacia menores avances incrementales de productividad, salvo la discontinuidad que se produce con la notable disminución en el consumo específico de combustible por unidad de producción mediante la última

---

8/ Enos, J.L. (1958).

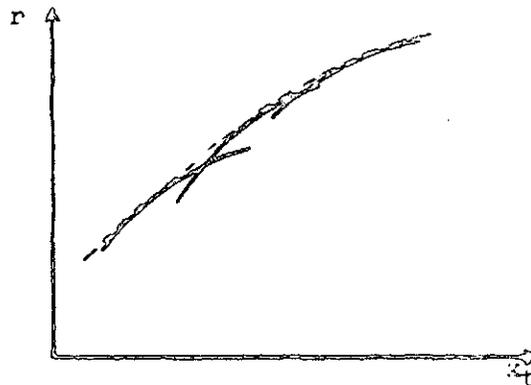
9/ Por un tratamiento de las consecuencias de optar por uno u otro criterio véase Atkinson, A.B. y Stiglitz, J. (1969).

mejora aquí considerada del proceso Houdry.

Este comportamiento es explicable en términos de una creciente aproximación a un virtual rendimiento máximo de la mano de obra y tasa máxima de conversión de materias primas en productos y de ahorro en el consumo unitario de combustible. En la medida que estos progresos están asociados a crecientes escalas de planta, su tasa decreciente a través del tiempo también está vinculada a la aparición de deseconomías de escala.

Lo anterior puede visualizarse mejor a través de la siguiente gráfica.

Gráfico 3



El progreso secular en el rendimiento (curva envolvente) puede visualizarse como el resultante de aumentos continuos (mejoras de procesos) y de aumentos discontinuos (nuevos procesos) en los rendimientos a través del tiempo. Los aumentos de carácter relativamente continuo se producen esencialmente a través de esfuerzos de ingeniería de planta. Los aumentos de carácter discontinuo responden en especial a esfuerzos de ingeniería de diseño de procesos. Si bien este punto merecerá considerable tratamiento en lo que resta del trabajo, hay un aspecto que interesa destacar aquí.

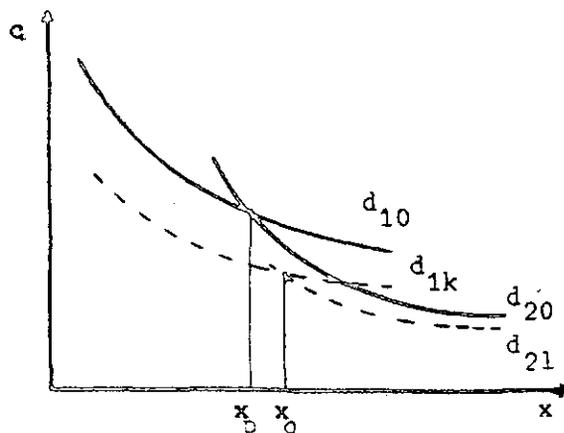
Hay dos tipos de aprendizaje a identificar en este proceso.

Uno es el que se refiere al aprendizaje en planta. El fruto de este aprendizaje permite mejorar la performance técnica de la planta, dado el proceso y dado el diseño del proceso. Otro es el que se refiere al aprendizaje en el diseño de plantas, para un proceso dado. Luego, para cada nuevo proceso habrá una nueva experiencia acumulativa para cada diseño sucesivo de ese proceso y para cada planta que resulte de cada diseño sucesivo del proceso. El aprendizaje en planta y en el diseño de plantas confluyen con el desarrollo de nuevo conocimiento básico y aplicado para la emergencia de los nuevos procesos.

Lo anterior implica que, cuando nos referimos a sucesivas mejoras introducidas respecto de un proceso dado, el Burton por ejemplo, estamos involucrando ambos tipos de aprendizaje. Esto, particularmente, porque los dos se complementan durante el curso de la trayectoria de mejoramiento de un proceso dado y, eventualmente, coadyuvan a la aparición de una discontinuidad; esto es, a la generación de un nuevo proceso. Estas distinciones permiten ahora avanzar en nuestro análisis.

Si puede esperarse que aquellos procesos cuyas escalas de "mínimo óptimo" son mayores tienen un menor potencial de aprendizaje que aquellos cuyas escalas correspondientes son menores, para mercados de dimensión reducida serán más ventajosos estos últimos. Gráficamente:

Gráfico 4



Cuando la dimensión del mercado local es bastante reducida en relación a la del mercado donde se utiliza proceso apropiado para mayores escalas y seguirá siéndolo por un período largo, la presencia del fenómeno que acabamos de describir puede hacer definitivamente más favorable la selección de un proceso más eficiente sólo para escalas menores, pero cuyo potencial de mejora sea proporcionalmente mucho más elevado que el del proceso de mayor escala.

Cuando, respecto de la selección entre los procesos 1 y 2, se pone de manifiesto su potencial relativo de mejora, esto permite también postponer el momento en que será necesario, en virtud del crecimiento del mercado, sustituir 1 por 2 por cuanto permitirá a 1 proseguir siendo más ventajoso a un nivel de demanda más elevado que el correspondiente a curvas que no consideren el proceso de aprendizaje (o sea  $x_p$  en lugar de  $x_q$ ). Si no se tienen en cuenta estas consideraciones se estará subestimando la ventaja relativa o sobreestimando la desventaja relativa del proceso adecuado a escalas menores a medida que se va expandiendo el mercado. En el gráfico se muestra que el potencial de mejora del proceso 1, expresado por la diferencia de costos unitarios entre el diseño inicial ( $d_{10}$ ) y el diseño optimizado obtenido en el momento  $k$  ( $d_{1k}$ ) es proporcionalmente mayor que el potencial de mejora del proceso 2, expresado por la diferencia de costos unitarios entre el diseño inicial ( $d_{20}$ ) y el diseño optimizado alcanzado en el momento  $c$  ( $d_{21}$ ) para cualquier volumen de capacidad que se considere.

Es preciso aquí hacer una advertencia respecto de la forma de encarar en la práctica la anterior discusión. Un testeo empírico directo de lo anterior, sobre la base de la comparación de procesos tipo 1 y 2 y de su tasa de mejora a través del tiempo, muy probablemente arroje resultados que no confirmen lo anterior. Inclusive es muy probable que los disconfirman. La razón es la siguiente. El análisis anterior es válido solamente si el punto de partida, esto es, la condición inicial de diseño para 1 y 2 se refiere a un mismo nivel de

experiencia acumulada en el diseño de los respectivos procesos (lo mismo se aplica a la experiencia acumulada en la producción de los bienes de capital para esos dos procesos). Así, por ejemplo, si la planta que tomamos como base para calcular el rendimiento a escala de 1 es de, digamos, quinta generación, mientras que la planta que tomamos como base para calcular el rendimiento a escala de diseño de B es de primera generación, lo más probable es que ocurra lo inverso de lo que venimos afirmando; esto es, que el potencial de aprendizaje de la planta que usa el proceso 1 sea menor, no mayor, que el de la planta que usa el proceso 2. Esto puede ocurrir en un testeo empírico de la hipótesis en la medida que las plantas adecuadas a mercados de dimensiones más reducidas están basadas en procesos de más antiguo origen donde por tanto, la experiencia acumulada de diseño es proporcionalmente mucho mayor que la correspondiente a procesos cuyas escalas óptimas son mucho mayores. Este punto será motivo de examen detallado en el capítulo VII.

## VI. LA RENTABILIDAD DEL SOBREDISEÑO

Identificamos en el capítulo IV varias fuentes de incertidumbre de carácter técnico y económico que afectan a la firma de ingeniería y a la propietaria del proyecto, tanto por separado como en sus relaciones mutuas. Esas incertidumbres determinan la existencia de un valor distinto de cero en el margen de sobrediseño. Pero este margen sólo será el más rentable si se cumplen ciertas condiciones.

Se distinguen dos aspectos del problema. El primero se refiere a la determinación del margen de sobrediseño más conveniente, dadas las incertidumbres técnicas y económicas en la fase pre-operativa y suponiendo que ese margen pueda ser plenamente explotado en la fase operativa. 1/ El segundo se refiere a la naturaleza -orientación y efectividad- de los esfuerzos de ingeniería de planta necesarios para explotar el margen de sobrediseño. Este capítulo se consagra a la dilucidación del primer aspecto. El segundo será examinado en el capítulo VII.

### VI.1. La determinación del margen de sobrediseño más rentable

Con objeto de simplificar el tratamiento formal del problema comencemos por suponer: (i) que existe perfecta certidumbre respecto del curso de la demanda; (ii) que la capacidad de financiamiento permite optar por el diseño más conveniente, y (iii) que hay perfecto flujo de información y ausencia de conflicto entre la firma propietaria del proyecto y la de ingeniería. Esto implica que habrá sólo incertidumbres técnicas de diseño como fundamento de la conveniencia racional de incurrir en un margen de sobrediseño y que ese margen será deliberadamente definido. Por otra parte, el margen de sobrediseño que ex-ante quede definido como el más rentable, también lo será ex-post en razón de la certidumbre, supuesta más arriba, respecto de su plena explotación mediante esfuerzos de ingeniería de planta durante la fase operativa del proyecto.

Procedamos ahora a la formulación analítica del problema. En ésta se hacen los siguientes supuestos adicionales en aras de un tratamiento matemático más sencillo. Primero, el precio corriente del producto se mantiene constante. Segundo, desde la puesta en marcha la capacidad se utiliza siempre a pleno y todo lo que se produce se vende al precio corriente. Tercero, la relación entre capacidad efectiva y capacidad nominal se mantiene constante a través del tiempo y se

---

1/ Sin duda, puede haber más de un sendero de mejora en la performance técnica de planta a partir de un dado margen de sobrediseño, con arreglo a distintos cursos de los precios relativos, y del avance del conocimiento. Por ej., el aumento de capacidad puede fundarse en un mayor reciclaje de un subproducto que se ha valorizado - y que previamente se desechaba - o en la sustitución de un insumo por otro que se ha abaratado o en una combinación de éstas y/u otras alternativas. Por simplicidad, trabajaremos en un comienzo con el supuesto de que la alternativa más ventajosa para explotar el margen de sobrediseño al iniciarse la fase operativa, continuará siéndolo en el futuro y es esa alternativa la única que consideraremos. Las implicaciones de este supuesto se pondrán de relieve en el capítulo VII.

verifica desde el mismo comienzo de la operación de la planta. 2/

Si la capacidad nominal más conveniente de la planta ya ha sido establecida, será entonces preciso determinar cuál es el margen de sobrediseño más rentable. El sobrediseño envolverá un cierto costo adicional de inversión. Es preciso entonces establecer cuáles son las condiciones necesarias para que la rentabilidad del sobrediseño sea máxima y positiva.

El sobrediseño se efectúa en relación a un proyecto esencialmente dado. En otros términos, las bases fundamentales del diseño del proceso, particularmente los equipos y el carácter de las transformaciones físico-químicas principales no son alterados. Se trata de modificaciones en el lay-out de planta; en aspectos no centrales de la secuencia de procesamiento, vgr. con objeto de reciclar subproductos; en la capacidad de equipos secundarios y auxiliares, etc.; esto es, variaciones en torno de un diseño básico. Por tanto, puede postularse una función de rendimientos al margen de sobrediseño que conste de una primera fase de rendimientos incrementales positivos y una segunda fase de rendimientos incrementales negativos al margen de sobrediseño.

Dado que el precio es constante, el ingreso total (Y) será tan sólo función de la capacidad (x). El costo total (C) también será función de la capacidad. Por tanto, el beneficio total (B) puede expresarse de la siguiente manera:

$$B(x) = Y(x) - C(x) = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{1}{(1+i)^t} [p \cdot x - x \cdot f(x)] \quad (1)$$

donde p representa el precio unitario, f(x) la función de costos unitarios, i la tasa de interés y t el período de planeamiento.

---

2/ Estos supuestos no deben considerarse forzados para que el problema sea resoluble. Dado que la diferencia entre capacidad efectiva y capacidad nominal difícilmente sea en la realidad mayor que dos o tres veces esta última (y usualmente no supera la mitad), la oferta adicional que se lance al mercado no habrá de tener mayor incidencia sobre el precio. Por ejemplo, si la oferta es compartida por partes iguales entre cinco oligopolistas, un margen de sobrediseño de .50 en que incurra uno de ellos tan sólo representará un aumento del diez por ciento en la oferta total. Si todos proceden de la misma manera ese aumento será del cincuenta por ciento, pero estará distribuido a través del tiempo de manera tal que podrá ser fácilmente absorbido por el crecimiento normal de la demanda. Por otra parte, si la capacidad terminal se alcanza, por ejemplo, en el quinto año en lugar que en el primero (como estamos suponiendo), sería tan sólo necesario sustraer la diferencia entre capacidad efectiva y capacidad terminal durante los primeros cuatro años al eventual beneficio que arroje la variante con sobrediseño para que ello sea tomado en cuenta. Asimismo, si como es habitual, hay un mínimo de esfuerzos de ingeniería de planta que es preciso efectuar aún en ausencia de sobrediseño, nuestro tratamiento implica que ese mínimo no debe ser aumentado en presencia de sobrediseño por cuanto tendrá un rendimiento mayor. Este mayor rendimiento se expresará en la posibilidad de superar la capacidad nominal a través del tiempo.

Deseamos ahora efectuar una transformación que nos permita expresar a  $x$  en función del margen de sobrediseño ( $\phi$ ). Siendo  $x_0$  la capacidad nominal, resulta  $x = x_0 \cdot (1 + \phi)$  y, haciendo por simplicidad,  $x_0 = 1$  y  $(1 + \phi) = u$ , sustituyendo en (1) obtenemos:

$$B(u) = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{1}{(1+i)^t} [p \cdot u - u \cdot f(u)] \quad (2)$$

La función de beneficios totales por sobrediseño,  $\beta(u)$ , resulta de diferenciar (2) con respecto a  $u$ , obteniéndose:

$$\beta(u) = \frac{dB}{du} = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{1}{(1+i)^t} \{p - [f(u) + u \cdot f'(u)]\} \quad (3)$$

Si se observa que los dos últimos términos del segundo miembro de la ecuación no son otra cosa que el costo marginal de producción <sup>3/</sup>, el beneficio total por sobrediseño resultará máximo cuando el costo marginal de producción sea mínimo.

El margen de sobrediseño más rentable estará dado por la igualación del beneficio marginal con el costo marginal por sobrediseño. Suponiendo que el costo adicional por sobrediseño aumenta proporcionalmente al margen de sobrediseño; esto es,  $K(u) = k \cdot u$ , donde  $K$  es el costo adicional por sobrediseño y  $k$  el factor de proporcionalidad <sup>4/</sup>, resulta  $K'(u) = k$  (costo marginal del sobrediseño). Por tanto, la condición  $\beta'(u) = K' = k$  resulta:

$$\sum_{t=1}^{t=n} \frac{1}{(1+i)^t} [-2 \cdot f'(u) - u \cdot f''(u)] = k \quad (4)$$

Denominando  $F(\phi)$  a  $f(u)$  y reemplazando en (4), se obtiene:

$$\sum_{t=1}^{t=n} \frac{1}{(1+i)^t} \cdot [-2 \cdot F'(\phi) - (1 + \phi) \cdot F''(\phi)] = k \quad (5)$$

<sup>3/</sup> En efecto, como se ha visto, el costo total es  $C = u \cdot f(u)$ . El costo marginal resulta de diferenciar el costo total con respecto a la cantidad, esto es

$$\frac{dC}{du} = f(u) + u \cdot f'(u)$$

<sup>4/</sup> Dado que se trata de un cálculo en el margen de una escala dada, estamos considerando un ajuste lineal de la curva de costos de inversión con respecto a la escala ( $k \cdot u$ ), donde normalmente  $0 < k < 1$ . Por evidencia apoyando este supuesto, ver Chenery, H., (1952).

La resolución de esta ecuación diferencial en  $\phi$  nos dará el valor del margen de sobrediseño más rentable.

$k$  puede ser considerado como el costo de oportunidad de los fondos de inversión requeridos para cubrir el sobrediseño. Si se la identifica con la tasa interna de retorno de la firma propietaria del proyecto (que incluye provisión por incertidumbre), la ecuación (5) nos expresa la rentabilidad mínima a ser obtenida del sobrediseño para que la firma incurra en la inversión adicional que ese sobrediseño demanda. En otros términos, la condición puede expresarse en términos de la siguiente inecuación

$$\sum_{t=1}^{t=n} \frac{1}{(1+i)^t} \cdot [-2.F'(\phi) - (1+\phi).F''(\phi)] - k \geq 0 \quad (6)$$

Cuanto más alto es el margen de incertidumbre y, por tanto, la tasa interna de retorno con que trabaje la firma, mayor deberá ser la rentabilidad del sobrediseño para que este resulte atractivo. Si la tasa interna de retorno con que trabaja la firma es muy elevada, puede incluso llegar a justificarse un margen negativo de sobrediseño. 5/

Hasta ahora hemos supuesto que sólo existían incertidumbres técnicas de diseño. Levantemos ahora este supuesto. Además de este tipo de incertidumbre pueden existir incertidumbres relativas, por ejemplo, a la posibilidad de obtener capital adicional o respecto del curso futuro de la demanda (en cuanto a cantidad y calidad) por parte de la firma propietaria del proyecto. Esto implicará un correspondiente aumento en  $k$  y, por tanto, en la rentabilidad marginal exigida al sobrediseño. La naturaleza del problema es enteramente análoga.

El problema se complica un tanto si no existe perfecto flujo de información entre la firma de ingeniería y la propietaria del proyecto o si existe la posibilidad de conflicto de interés entre ambas. En estos casos lo más probable es que resulte imposible determinar un margen de sobrediseño que corresponda al más rentable porque habrá soluciones duales de acuerdo con que se las mire desde el punto de vista de la firma de ingeniería o desde el de la firma propietaria del proyecto; el margen definitivo resultará de la fuerza relativa de negociación entre ambas. 6/

---

5/ Por mayores detalles relativos al tratamiento matemático del problema en cuestión ver la nota final a este capítulo.

6/ El problema se complica aún más si trata de establecer la máxima rentabilidad del sobrediseño no en términos privados, como hemos hecho hasta ahora, sino en términos sociales. Pueden existir externalidades que no sean apropiables por la firma que sobrediseña. Por ejemplo, si el sobrediseño es suficientemente sustancial, pueden justificarse inversiones por terceras firmas que benefician no sólo a la firma que sobrediseña sino también a sus competidoras (inversiones que, de otra manera, no tendrían lugar). En ese caso, el sobrediseño bien podría resultar rentable en términos sociales aunque no lo sea a

Agreguemos, finalmente, que el problema de la determinación del margen de sobrediseño más rentable puede conjugarse con el de la definición de la escala de planta más conveniente. La firma propietaria del proyecto puede situarse ante la alternativa de sobrediseñar para una condición de diseño dada, o bien, proceder a adoptar una condición de diseño distinta correspondiente a una mayor escala.

Sin perjuicio del tratamiento formal de este problema, abordado en la nota final a este capítulo, adelantamos la solución intuitiva del mismo. Se optará por sobrediseñar, en lugar de elegir una escala mayor, cuando el beneficio (descontado) del sobrediseño sea mayor que el que resulte de las economías de escala que se obtengan en virtud de una escala mayor. En otros términos, el recurso al sobrediseño será tanto menos atractivo cuanto mayor sea la reducción de costos unitarios por pasar a la escala más elevada; y será tanto menor atractivo cuando más insensible sea el costo unitario ante un cambio en la escala nominal del diseño de referencia. En la práctica, lo más probable es que se defina una solución que combine las ventajas de uno y otro proceder.

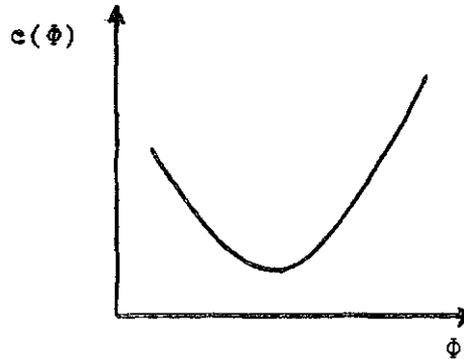
## VI.2. Nota: especificación de la función de costos

Supongamos que la función de costos unitarios  $F(\Phi)$ , para  $x_0=1$ , revista la forma cuadrática normal de una parábola invertida, como lo exhibe el gráfico 5 y expresa la ecuación (7) (las escalas son arbitrarias).

---

nivel privado. La consideración del "óptimo" de sobrediseño ("óptimo" en un momento dado), a nivel social implica tener presente un número de requisitos que no necesariamente se satisfacen en la práctica. Entre ellos, los más relevantes son: (i) evaluar posibles externalidades pecuniarias y tecnológicas - en especial, posibles efectos de aprendizaje tecnológico que el sobrediseño puede acarrear; (ii) contar con un juego de precios presentes y futuros considerados socialmente óptimos respecto de todo tipo de insumos y productos; (iii) disponer de información correcta respecto de las calidades de los insumos y de sus posibles modificaciones con el transcurso del tiempo; (iv) tener un conocimiento adecuado de todas las alternativas técnicas posibles y de sus cambios en el tiempo, sin tropezar con obstáculos artificiales para su acceso; (v) conocer la estructura de las necesidades sociales y sus cambios en el tiempo de modo que ellas sirvan de guía para la definición de las especificaciones mínimas requeridas de los productos, y (vi) contar con la posibilidad de disponer de equipos con las especificaciones adecuadas. Es claro que éstas son condiciones altamente ideales. Empero, el hecho de que difícilmente se observen en la práctica, particularmente en los países en desarrollo, de ninguna manera implica que el camino deba recorrerse a ciegas. En el proceso de maduración tecnológica pueden identificarse ciertos caminos críticos que permiten una aproximación razonada y controlada hacia la incorporación de diseños progresivamente más adecuados a la estructura productiva del país que se trate. Este punto será considerado con más detalle en los siguientes capítulos.

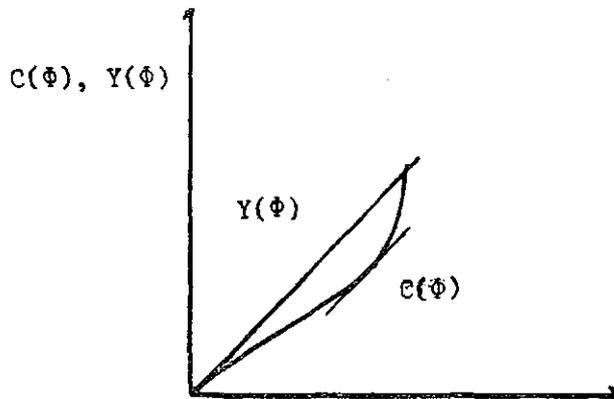
Gráfico 5



$$c(\phi) = (1+\phi)^2 - b.(1+\phi) + d \quad (7)$$

La función de costos totales se obtiene multiplicando la función de costos unitarios por la capacidad. Su forma será como exhibe el gráfico 6, que también incluye la curva de ingresos totales.

Gráfico 6



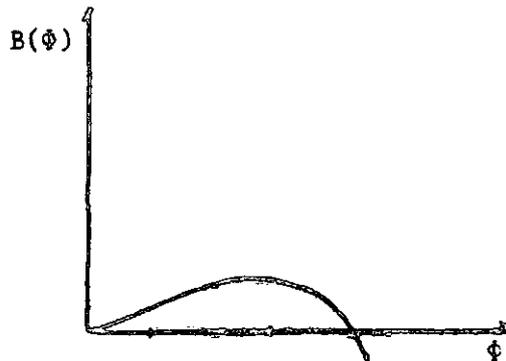
$$Y(\phi) = p.(1+\phi) \sum_{t=1}^{t=n} \frac{1}{(1+i)^t} \quad (8)$$

$$C(\phi) = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{1}{(1+i)^t} \{ (1+\phi)^3 - b.(1+\phi)^2 + d.(1+\phi) \} \quad (9)$$

El margen de sobrediseño para el cual el beneficio total es máximo será aquel en que la pendiente de la tangente de la curva de costos totales (costo marginal en ese punto) se iguala a la pendiente de la función de ingresos totales (precio). 7/

La función de beneficios totales será entonces como la expresa la ecuación 10 y exhibe el gráfico.

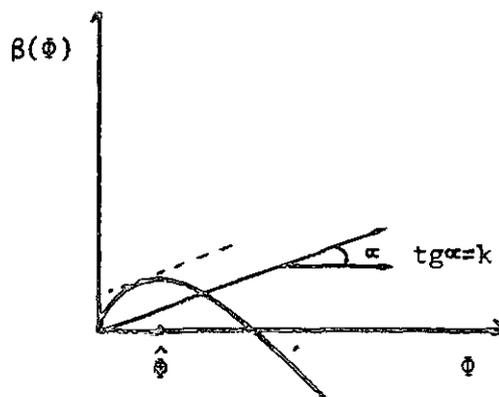
Gráfico 7



$$B(\phi) = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{1}{(1+i)^t} \{p \cdot (1+\phi) - (1+\phi)^3 + b \cdot (1+\phi)^2 - d \cdot (1+\phi)\} \quad (10)$$

Diferenciando (10) con respecto a  $\phi$  obtenemos la función de beneficios adicionales por sobrediseño, como lo exhibe el gráfico y lo expresa la ecuación (11). 8/

Gráfico 8



7/ Obviamente, si en la abscisa, en lugar de representar el valor de  $\phi$  expresásemos el eje temporal, la función de ingresos totales se tornaría de forma exponencial.

8/ En todos los gráficos, si bien el eje de las ordenadas es arbitrario, el eje de las abscisas emplea las mismas escalas.

$$\beta(\phi) = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{1}{(1+i)^t} \{p - 3.(1+\phi)^2 + 2.b.(1+\phi) - d\} \quad (11)$$

El máximo beneficio adicional por sobrediseño corresponde a aquel margen de sobrediseño para el cual el costo marginal de producción es mínimo, como se puede verificar fácilmente.

Para determinar analíticamente el margen de sobrediseño más rentable igualamos ahora el beneficio adicional marginal con el costo marginal del sobrediseño.

$$\beta'(\phi) = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{1}{(1+i)^t} \{-6.(1+\phi) + 2b\} = k \quad (12)$$

y, resolviendo para  $\phi$ ,

$$\hat{\phi} = \frac{1}{3} \left( b - \frac{k}{2 \cdot \sum_{t=1}^{t=n} \frac{1}{(1+i)^t}} \right) - 1 \quad (13)$$

Por tanto, dada la tasa de descuento y conocidos los beneficios por sobrediseño, según (13) el margen más rentable por sobrediseño  $\hat{\phi}$  será una función lineal decreciente del costo marginal del sobrediseño, o, si se prefiere, de la tasa interna de retorno de la firma propietaria del proyecto. Asimismo, puede observarse que, ceteris paribus, cuanto mayor es la tasa de descuento en el tiempo, mayor será el margen más rentable de sobrediseño.

Procedamos ahora a levantar el supuesto de que la escala óptima de la planta ya ha sido definida cuando se considera la estimación del margen de sobrediseño más rentable. En este caso, la función de costos totales dependerá no sólo del margen de sobrediseño, sino también de la escala de la planta. Por tanto, en este caso

$$C = F(\phi, \Psi) \quad (14)$$

donde  $\Psi$  es un índice de las economías de escala.

Teniendo presente el supuesto usual de que la función de costos tiene una elasticidad constante de la capacidad con respecto al costo en casi toda su extensión, se la puede aproximar con la siguiente expresión:

$$C = a \cdot x^{1/\Psi} \quad (15)$$

donde  $C$  es el costo total,  $a$  una constante y  $\Psi$  el coeficiente de escala que tiene usualmente un valor de 1,5 para la planta de procesos en su conjunto. Agregando las ecuaciones (9) y (15) y deduciendo el resultado del beneficio total (en ambos casos previa aplicación del factor de descuento) se obtiene la función de beneficios en términos del margen de sobrediseño y el coeficiente

de escala.  $\frac{9}{}$  (16)

$$B(\phi) = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{1}{(1+i)^t} \cdot \left\{ p \cdot (1+\phi) - \frac{1}{2} (1+\phi)^3 + \frac{b}{2} (1+\phi)^2 - \frac{d}{2} (1+\phi) - \frac{a}{2} (1+\phi)^{1/\psi} \right\}$$

Diferenciando (16) con respecto a  $\phi$  obtenemos la función de beneficio por sobrediseño

$$\beta(\phi) = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{1}{(1+i)^t} \cdot \left\{ p - \frac{3}{2} (1+\phi)^2 + b \cdot (1+\phi) - \frac{d}{2} - \frac{a}{2\psi} (1+\phi)^{1/\psi - 1} \right\} \quad (17)$$

Obsérvese que si la elasticidad de la escala al costo fuese unitaria ( $\psi=1$ ), esto es, en ausencia de economías de escala, los beneficios totales por sobrediseño, cuando se calcula su máximo, son iguales a como ya los habíamos definido más arriba (mínimo costo marginal).

Para determinar de qué manera influye la sensibilidad a escala sobre el margen más rentable de sobrediseño, reiteramos el procedimiento anterior, esto es, investigamos el máximo de la función de beneficios por sobrediseño (para un dado costo por sobrediseño).

$$\beta'(\phi) = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{1}{(1+i)^t} \left\{ -3 \cdot (1+\phi) + b - \frac{a}{2\psi} \cdot \left( \frac{1}{\psi} - 1 \right) \cdot (1+\phi)^{1/\psi - 2} \right\} = k \quad (18)$$

Reordenando términos

$$3 \cdot (1+\phi) + \frac{a}{2\psi} \left( \frac{1}{\psi} - 1 \right) \cdot (1+\phi)^{1/\psi - 2} = b - \frac{k}{\sum_{t=1}^{t=n} \frac{1}{(1+i)^t}} \quad (19)$$

De la ecuación (19) se infiere claramente que, si la elasticidad de la escala al costo de inversión aumenta, el margen de sobrediseño deberá ser correspondientemente más elevado para que el beneficio por sobrediseño no se reduzca.

---

$\frac{9}{}$  Una vez expresada la ecuación (15) en términos de margen de sobrediseño mediante la transformación  $x = x_0(1+\phi)$ , para  $x_0 = 1$ .



## VII. SOBREDISEÑO Y APRENDIZAJE

En el capítulo VI se dió por sentado que el potencial adaptativo implícito en el margen de sobrediseño puede ser explotado en su plenitud mediante esfuerzos de ingeniería de planta. Llegó ahora el momento de examinar con mayor detenimiento la naturaleza de las relaciones entre condiciones iniciales de diseño y performance técnica de planta (aprendizaje). Previamente, especificaremos el concepto de aprendizaje en planta.

### VII.1. Optimización y ruptura de cuellos de botella

Dadas las condiciones iniciales de diseño, el elenco de ingeniería de planta emplea sus esfuerzos de dos maneras distintas: (i) optimización y (ii) ruptura de cuellos de botella. Los esfuerzos de optimización consisten en "toques" del proceso sin afectar la operación. Se trata de progresivos ajustes marginales en los parámetros de las reacciones (temperatura, presión, tiempo de residencia, márgenes de seguridad). Para encarar los esfuerzos de optimización existen metodologías bien desarrolladas, tales como la EVOP (Evolutionary Operation) y sus distintas variantes: ROVOP (Rotaring Square Evolutionary Operation), REVOP (Random Evolutionary Operation), Secuencial, etc. También hay metodologías que, a distinción de las anteriores, no aplican herramientas de tipo estadístico, tales como los métodos Simplex, Steepest Ascent, Response Surface, etc. 1/ Todos estos métodos para encarar la optimización de un proceso en operación implican el ejercicio de provocar modificaciones en las condiciones operativas para observar variaciones en las respuestas y, así, analizar el sendero de desplazamiento hacia el óptimo, dadas las condiciones físicas y mecánicas de diseño.

A medida que se avanza en la optimización de un proceso mediante este tipo de esfuerzos de ingeniería de planta, se arriba a ciertas limitaciones, cuellos de botella, que van reduciendo su rendimiento incremental. Una vez generado un cuello de botella, ya no se puede avanzar mucho mediante esfuerzos de optimización. Es preciso efectuar la ruptura del cuello de botella; esto es, modificar las condiciones físicas y mecánicas de diseño. A partir de tal modificación es posible iniciar otro ciclo de optimizaciones que conduzca a la identificación de nuevos cuellos de botella, y así sucesivamente. En los apéndices C y D al presente documento se brindan algunos ejemplos concretos respecto de la forma en que las firmas estudiadas encaran la optimización de condiciones operativas y la ruptura de cuellos de botella.

Los esfuerzos de ruptura de cuellos de botella implican, por tanto, discontinuidades en el curso de mejora de planta; en tanto que, los esfuerzos de optimización, consisten en mejoras marginales, paulatinas y continuas en el rendimiento de planta. La resultante curva de aprendizaje resulta, entonces, del ajuste o estilización de la tendencia real. Esta está constituida por la adición de avances alternados continuos (optimización) y discontinuos (ruptura de cuellos de botella) en el rendimiento de planta.

---

1/ Cfr. Orsi, D.A. (1974).

Es de suponer que, normalmente, los esfuerzos de ruptura de cuellos de botella significan un mayor desafío a la imaginación que los de optimización. Es mucho más factible contar con rutinas para ejercicios de optimización que para decisiones orientadas a cambiar las condiciones de diseño. Este tipo de decisiones requiere poner en juego de manera más amplia y profunda los conocimientos del elenco de ingeniería de planta. Dado que lo sustancial de los cambios en la capacidad efectiva responde a ese tipo de decisiones, en lo que sigue nos concentraremos en el estudio de los esfuerzos de ruptura de cuellos de botella.

Citemos aquí a Rosenberg, cuando afirma: "(La)...mayoría de las firmas... se encuentran bajo presión para adoptar decisiones que prometen un rápido repago en un período relativamente corto con respecto, al menos, a la mayoría de las limitaciones impuestas por la planta existente. Se confrontan con el tipo existente de actividades productivas como un inevitable punto de partida. Son naturalmente guiados a buscar el horizonte tecnológico...dentro del marco de esas actividades y a atacar sus restricciones más limitativas... La mayoría de los procesos productivos mecánicos arrojan signos de un carácter compulsivo y bastante obvio; en realidad, estos procesos, cuando son suficientemente complejos e interdependientes, implican una casi compulsiva formulación de problemas. Estos problemas capturan una gran proporción del tiempo y energías de aquellos involucrados en la búsqueda de técnicas mejoradas... Esto sugiere que puede ser posible formular un enfoque microeconómico del cambio técnico en términos del análisis de desembotellamientos. 2/

La afinidad entre estas ideas y las que informan el enfoque del presente estudio son suficientemente claras como para requerir mayor comentario. Proseguimos, entonces, con el hilo del argumento.

Es muy difícil que, cuando una planta alcanza lo que se denomina "régimen normal de operación" 3/ no exista ningún margen de ruptura de cuellos de botella; esto es, se encuentre en un equilibrio interoperacional pleno. Lo habitual es que, debido a indivisibilidades de items específicos de equipo, a diversos equilibrios necesarios de carácter termodinámico, y a otras causas, haya operaciones que actúen como limitativas de otras que no puedan utilizarse a rendimiento máximo. Esto ocurre habitualmente cuando la planta se diseña para una capacidad menor de la que permitirían sus equipos principales. Tal el caso, vgr., respecto del tren de fraccionamiento de una planta olefínica. Su capacidad puede calcularse como para permitir futuras expansiones a través del ajuste del resto de la planta al sobredimensionado de las torres. Pero también puede ocurrir que el curso del aprendizaje de planta no consista en ir reduciendo la sobrecapacidad de una particular sección de la planta, sino que los cuellos de botella se vayan trasladando, con el transcurso del tiempo, de unas operaciones unitarias a otras. Este sería el caso cuando no hay diferencias muy acentuadas entre las

---

2/ Rosenberg, N. (1976).

3/ En realidad, este concepto se refiere al óptimo operativo ingenieril correspondiente a la condición inicial de diseño. Ahora bien; para cada subsiguiente modificación de esa condición inicial existirá un "régimen normal" u óptimo operativo correspondiente distinto (que se va alcanzando progresivamente vía esfuerzos de optimización).

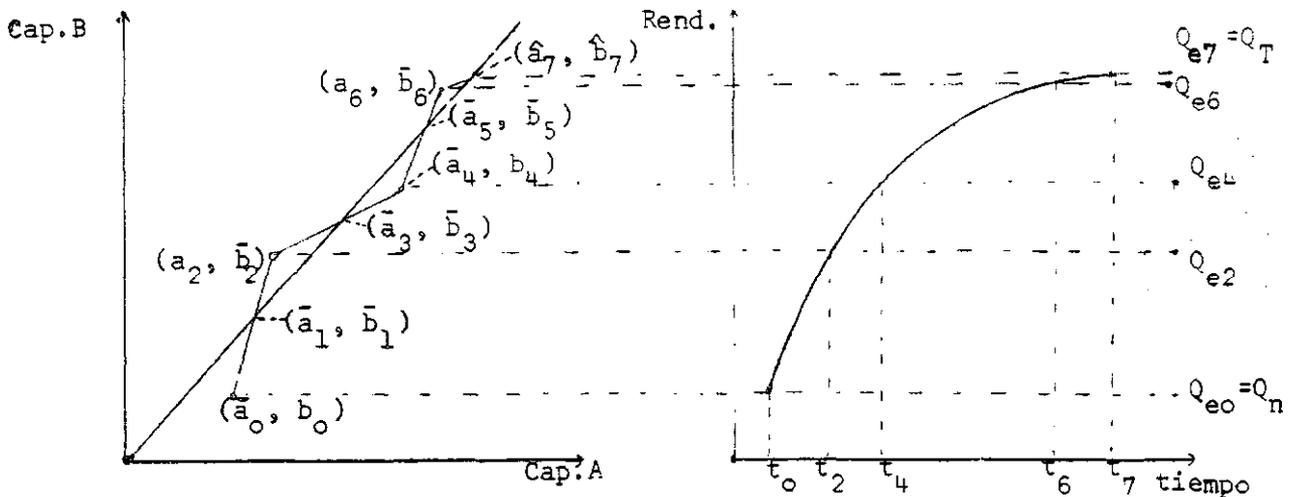
diversas secciones de la planta en cuanto a su potencial adaptativo.

Consideremos un ejemplo que consiste en una planta con sólo dos operaciones unitarias (separación y purificación, por ej.). También podríamos suponer que una de esas operaciones, o las dos, consiste en realidad en la agregación de un conjunto de operaciones que mantienen su equilibrio recíproco. En el gráfico 9 se examina el curso del proceso de aumento de la capacidad de la planta mediante ruptura de cuellos de botella tendiendo, por un lado, a las relaciones entre las capacidades de las dos operaciones unitarias de la planta (parte izquierda) y, por el otro, al curso de la capacidad agregada de la planta (parte derecha).

Gráfico 9

a) Operaciones Unitarias

b) Planta



Comencemos por el gráfico concerniente a la relación entre las capacidades de ambas operaciones unitarias. La recta al origen que cruza el cuadrante exhibe las relaciones teóricas de equilibrio entre ambas capacidades. Cualquier punto a la derecha de esa recta implica un subdimensionamiento relativo de la operación A (o un sobredimensionamiento relativo de la operación B). Cualquier punto a la izquierda de la recta supone un subdimensionamiento relativo de la operación B (o un sobredimensionamiento relativo de la operación A). Dado que adoptamos como objetivo el de aumentar la capacidad de la planta -que, como se ha visto, no necesariamente excluye otros objetivos tales como reducción de costos unitarios sino que, al contrario, con frecuencia ambos objetivos marchan juntos- siempre se tenderá a orientar los esfuerzos de ingeniería de planta hacia el equilibrio interoperativo más elevado. En consecuencia, si nos ubicamos desde esta perspectiva, un punto por debajo de la recta de equilibrio conducirá a aumentar la capacidad de B y no a reducir la capacidad de A. El cuello de botella será la capacidad de B. Por tanto, cualquier punto así ubicado será considerado como una situación a ser superada por medio del redimensionado de B. Contrario sensu, cualquier punto a la izquierda de la recta de equilibrio será considerado como una situación a ser superada vía un redimensionado de A.

Supongamos ahora que se parte del punto  $(\bar{a}_0, \bar{b}_0)$ , donde el subíndice indica tiempo y el guión por sobre a nos dice que el cuello de botella no está en  $a$ , sino en  $b$ . Tal punto corresponderá a la condición inicial de diseño, una vez alcanzado el régimen normal de operación. Obviamente, en la medida que, a través de un desembotellamiento de la capacidad de la operación unitaria  $B$ , se logre aumentar la capacidad de la planta sin recurrir a inversiones significativas en activo fijo, nos encontramos ante un caso de sobrediseño. Una vez roto ese cuello de botella y forzada la capacidad de  $A$  al máximo, se arribará a un punto como el  $(a_2, b_2)$ , donde el problema residirá en la limitación que impone la capacidad de la operación unitaria  $A$ . Antes de alcanzar ese punto se habrá pasado más o menos fugazmente por el punto  $(\bar{a}_1, \bar{b}_1)$ , el primero de equilibrio teórico que se atraviesa. El paso es fugaz en razón de que hay alguna indivisibilidad en la capacidad de  $B$  que no permite aumentarla exactamente en  $(b_1 - \bar{b}_0)$  unidades de capacidad, sino en algo más.

A partir del punto  $(a_2, \bar{b}_2)$  se procede a aumentar la capacidad unitaria de  $A$ , hasta que se arriba al punto  $(a_4, b_4)$ , pasándose previa, aunque fugazmente, por el punto  $(\bar{a}_3, \bar{b}_3)$ , y así sucesivamente. El proceso de mejora en la performance técnica de la planta, traducido en sucesivos aumentos en la capacidad efectiva de la planta llega a su climax cuando, una vez desembotellada la operación unitaria limitativa de que se trate, se alcanza un punto suficientemente cercano a la recta de equilibrio en el cual el costo de explotar las economías latentes de escala aun subyacentes deje de ser menor que el beneficio que ello acarree en términos de aumento de la capacidad efectiva de la planta. Tal, por ejemplo, el punto  $(\hat{a}_7, \hat{b}_7)$ .

Obsérvese que, a medida que se avanza en el curso del proceso de ruptura de cuellos de botella, los aumentos adicionales en la capacidad efectiva de la planta son cada vez menores. Esto expresa el decreciente potencial de mejora que manifiesta la planta. 4/

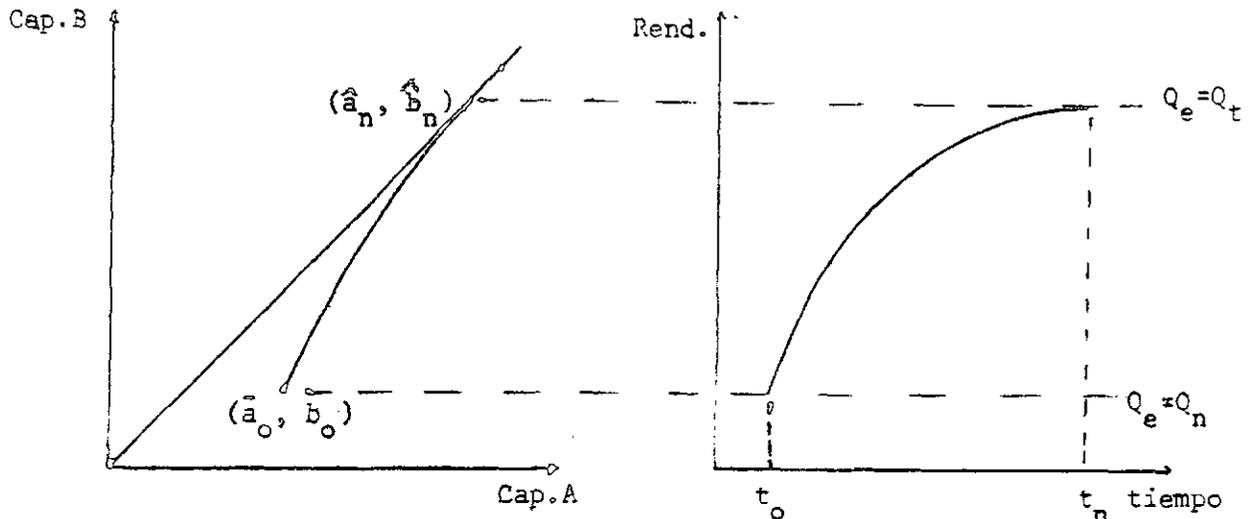
Durante el curso de las acciones de ruptura de cuellos de botella, es usual que, para que los esfuerzos de ingeniería fructifiquen en términos de mejoras en la capacidad efectiva de la planta, sean precisas ciertas inversiones en activo fijo. Pero es claro que, si estas inversiones son importantes, será difícil distinguir entre aumento de la capacidad de la planta por sobrediseño, por un lado, y por ampliación de la planta, por el otro (esto último no requiere ningún margen de sobrediseño). Por tanto, para que podamos realmente hablar de mejora en el rendimiento de la planta a partir de la explotación de su margen de sobrediseño, reiteramos que es preciso definir un límite máximo a las inversiones que acompañen ese esfuerzo. Ese límite lo definimos en términos de que no sean necesarias inversiones para sustituir a los equipos principales.

---

4/ En realidad, puede ocurrir que la planta alcance el punto de agotamiento en la explotación de su potencial de aprendizaje sin que a ese punto corresponda un perfecto equilibrio entre las operaciones unitarias (como se supone en el gráfico por simplicidad), dado que estamos suponiendo ausencia de inversiones significativas en activo fijo. Tal sería el caso si, para efectuar la ruptura de un dado cuello de botella, esas inversiones fuesen necesarias. Por otra parte, parece realista suponer una tendencia convergente hacia el equilibrio interoperacional a medida que se avanza en el proceso de desembotellamientos.

En la medida que esto es así, el caso más usual será el que aludimos más arriba; esto es, que el curso del proceso de mejora en la performance técnica de la planta consista en ir reduciendo el sobredimensionado de una particular sección de la misma (la más indivisible). En este caso, el proceso adoptará la forma que exhibe el gráfico 10.

a) Operaciones Unitarias Gráfico 10 b) Planta



Como puede apreciarse, el curso de la marcha hacia la máxima capacidad de planta (o capacidad terminal) consiste en ir reduciendo paulatinamente el déficit en la capacidad de la operación unitaria B, por cuanto se adopta a la capacidad de la operación unitaria A como vara del equilibrio interoperativo de la planta. La reducción en el déficit de capacidad de B, que en el gráfico 10 se presenta como un proceso continuo, en realidad puede contener tramos continuos y discontinuos en la medida que resulte de la sucesión acumulativa de esfuerzos de optimización y de ruptura de cuellos de botella referidos a la capacidad de B cuyo grado de indivisibilidad es mucho menor al de A. 5/

En el proceso de búsqueda que llevamos descripto pueden existir ciertos sesgos en cuanto al uso y ahorro relativo de mano de obra y capital, con arreglo a diversas influencias de las variables macroeconómicas. De hecho, las secuencias de Rosemberg pueden hacer que el sendero adaptativo cobre cierta insensibilidad respecto del curso de los precios relativos y de la demanda. Nelson y Winter, en su tratamiento de las "trayectorias naturales" del cambio técnico parecen coincidir con ello al afirmar: "En parte de la literatura sobre avance tecnológico hay una idea de que la innovación posee cierta lógica interna propia. En contraste con la preocupación central de los modelos de los economistas -que suponen una muy calculada respuesta a las condiciones de la

5/ Como puede apreciarse, el punto de equilibrio interoperacional  $(\hat{a}_n, \hat{b}_n)$  es, en este caso, el primero y último que alcanza la planta.

demanda y sus cambios y una amplia serie de proyectos para evaluar rentabilidad- ..., los avances parecen sucederse de manera tal que parecen algo 'inevitable' y ciertamente no finamente graduados en función de cambios en la demanda y en los costos... Cuellos de botella en procesos conectados, obvios puntos débiles en productos, claros objetivos de mejora, etc.,... ofrecen agudas señales de que ciertos proyectos de ID son rentables bajo una variada gama de particulares condiciones de demanda y de costo. Cambios marginales en las condiciones externas influncian a lo sumo el ranking de esos proyectos en términos de la rentabilidad del conjunto de proyectos elegibles asociados con la mejora tecnológica en una particular dirección. Sugerimos que tales trayectorias naturales son importantes, y que pueden ser estudiadas". 6/

Cabe aquí también recordar a Salter cuando afirmaba que los empresarios no están interesados en reducir costos particulares, sino los costos totales. Si las secuencias compulsivas coadyuvan a esa reducción de los costos totales bienvenidas sean, aunque no impliquen necesariamente un ajuste muy fino de las proporciones de los factores a los cambios en precios relativos y condiciones de demanda. Por otra parte, cabe esperar que de hecho esa insensibilidad sea mayor a nivel de ingeniería de planta que de ingeniería de diseño. La razón es que esta última cuenta con mayores grados de libertad en la definición y adopción de alternativas.

Por ello optamos por poner el énfasis, no tanto en los efectos de esas influencias para reducir costos, cuanto en la secuencia particular y el timing del esfuerzo innovativo. Convenimos, así, con Rosemberg cuando afirma "La dificultad con los incentivos económicos al cambio técnico como una variable explicativa es precisamente que ellos son tan ubicuos. En el reino de la teoría pura, un empresario preocupado por maximizar beneficios bajo condiciones competitivas explotará cualquier posibilidad de reducir costos, independientemente de cuál factor será economizado. ¿Qué fuerzas, entonces, determinan la dirección que una firma de hecho adoptará en su exploración de nuevas técnicas? Dado que no puede explorar en todas direcciones, ¿cuáles son los factores que inducen a golpear en una dirección particular? Aún mejor, ¿hay algunos factores que compelen en alguna dirección más que en otras?". En sus respectivos trabajos, Atkinson y Stiglitz y David también adoptan similar enfoque. 7/

Desde luego que, como en tantas otras cosas, también aquí hay una cuestión de grado. Cambios muy acentuados en los precios relativos de los insumos de mayor importancia, por ej., difícilmente dejen de influenciar la orientación de los esfuerzos adaptativos, inclusive de manera decisiva. Un claro ejemplo al respecto puede observarse en la influencia que la crisis del petróleo ha tenido sobre la orientación de los esfuerzos innovativos de la industria química, tanto en Europa como en los Estados Unidos. 8/

---

6/ Nelson, R.R. y Winter S.G., ob, cit. pp.56-57.

7/ Rosemberg, N. op. cit; Atkinson y Stiglitz, op.cit.; David, P. (1975).

8/ Cfr., por ej., Chemical Engineering, Feb. 14, (1977).

## VII. 2. Curvas de Aprendizaje y Condiciones Iniciales de Diseño

Los estudios sobre curvas de aprendizaje han revelado que, para ciertas actividades manufactureras específicas, por ej., el ensamblado de aviones o la fabricación de máquinas-herramientas, existe una tasa definida a la cual el costo unitario en horas-hombre decrece a medida que aumenta el nivel de la producción acumulada. Se ha encontrado, para los dos casos mencionados, coeficientes de ahorro de insumos laborales unitarios próximos al 20 por ciento a medida que se va duplicando el volumen de la producción acumulada. 9/

Con el tiempo el concepto se fue generalizando a otras industrias. Así, por ej., se llegó a la conclusión de que aquellos que piensan que sólo es aplicable para actividades mano de obra intensivas incurren en un error. El hecho de que la experiencia y habilidad de la mano de obra directa tenga poca influencia sobre el ritmo productivo no descarta la existencia de un fenómeno de aprendizaje; sólo reduce su importancia. 10/

Con todo, da la impresión de que los estudios sobre curvas de aprendizaje tienden a exagerar la aplicabilidad del concepto para fines predictivos, en virtud de una deficiente o ausente especificación de las condiciones iniciales a partir de las cuales se aprende. Cuando se trata de decisiones que afectan la asignación de recursos en el tiempo, el valor predictivo de un instrumento o indicador es esencial. En nuestro caso, nos interesa desde el punto de vista de aquellas decisiones que afectan la intensidad y características del empleo de la capacidad de ingeniería a nivel de planta. Deseamos reexaminar su valor desde el ángulo de las relaciones que existen entre el fenómeno del aprendizaje y el desarrollo y empleo de la capacidad de ingeniería a nivel de planta.

Postulamos que la rapidez con que aumentan los rendimientos merced al fenómeno del aprendizaje, así como el máximo nivel de rendimiento alcanzable (correspondiente a la capacidad terminal), si bien puede depender de la capacidad técnica, organizativa y empresarial de la firma, dadas las condiciones -físicas y económicas- de contorno, así como de las características del proceso (vgr. intensidad en el uso de mano de obra), no depende sólo de ello. 11/ Para un proceso, una capacidad técnica, organizativa y empresarial y un contorno dados, la condición inicial de diseño delimitará tanto el ritmo y el sesgo como el máximo aprendizaje alcanzables. Cuanto mayor sea el margen de sobrediseño, dentro de ciertos límites a definir, menor será el costo de ingeniería por unidad de mejora en el rendimiento de la planta. Expresado en otros términos, la elasticidad de aumentos en la capacidad efectiva a partir de gastos de ingeniería de planta será tanto mayor, dentro de ciertos límites, cuanto mayor sea el margen de sobrediseño.

---

9/ Asher, H (1956); Zieck, R.P. (1962); Wright, T.P. (1936); Hirsch, W.Z. (1959).

10/ Hirschmann, W.B. (1964). Ver también: Andress, F.J. (1954).

11/ Dado el costo de inversión de planta, todo aumento de capacidad efectiva implicará un mayor rendimiento por unidad de capital. Por tanto, utilizamos los conceptos de aumento de rendimiento y aumento de capacidad efectiva como sinónimos.

Así, una firma que cuente con dos plantas con distintos márgenes de sobrediseño se verá estimulada a consagrar más recursos de ingeniería (a igual calidad de estos recursos) a la planta para la cual ese margen sea mayor, hasta el punto en que el rendimiento marginal de la hora-hombre de ingeniería se iguale en ambos casos. Es de esperar, empero, que el rendimiento medio será mayor en el caso de la planta con mayor margen de sobrediseño. Mientras que el criterio de la igualación de los rendimientos marginales del gasto en ingeniería de planta puede aplicarse con independencia del conocimiento que se tenga respecto de la influencia de las condiciones iniciales de diseño sobre el rendimiento de ingeniería de planta, esto será cierto en cada momento en que se cotejen los rendimientos marginales respectivos en cada planta. No lo será, empero, si se trata de una decisión ex-ante por la cual deba planearse la asignación de recursos de ingeniería en relación a ambas plantas. En este caso será preciso contar, al menos, con ciertas presunciones respecto del margen de sobrediseño explotable. 12/

Si lo anterior es correcto, nos confrontamos con un aspecto importante de la asignación de recursos científico-técnicos a nivel microeconómico. Se infiere que, dependiendo de la magnitud del sobrediseño de las plantas, se aplicarán los recursos de ingeniería con distintas prioridades, lo cual influirá sobre la eficacia de su empleo y la asignación de áreas a las cuales se referirá la experiencia subsiguientemente acumulada. Por ejemplo, si las condiciones iniciales de diseño tienden a sobredimensionar en el área de catálisis (empleo de catalizadores de una eficacia mayor a la requerida para alcanzar el equilibrio interoperacional de planta) y a subdimensionar los reactores, es muy probable que los esfuerzos mejorativos de ingeniería de planta se concentren relativamente más sobre problemas de diseño de reactores que de catálisis. Ceteris paribus será, por tanto, en ese primer área donde se acumulará más experiencia. Si la experiencia inicial del plantel de ingeniería de planta era más elevada en lo relativo a catalizadores que a diseño de reactores, esa experiencia deberá derivarse, tanto como sea posible, a este último campo. En la medida que esta asignación de recursos de ingeniería, en lugar de obedecer a criterios planeados, dentro de lo que admitan los márgenes de incertidumbre derivada del conocimiento alcanzado al tiempo de diseño de la planta, se tome como un dato exógenamente dado, se estará preconditionando y reduciendo los grados de libertad de un aspecto importante del desarrollo científico-técnico.

Si el ritmo de aprendizaje correspondiente a una variante de diseño de un proceso es mucho más elevado que el correspondiente a otra variante pero se agota a un nivel mucho menor puede llegar a ser preferible la segunda variante en lugar de la primera (si el período de planeamiento es suficientemente largo y a igual tasa de descuento). Por tanto, si no puede predecirse, dentro de razonables márgenes de error, cuál será el máximo nivel de rendimiento que pueda llegar a alcanzar una planta, la mera combinación entre tasas históricas de aprendizaje nos dirá bien poco.

Hay un grupo de relaciones entre condición inicial de diseño y otras variables que interesa analizar aquí. Esas otras variables son: (i) la tasa de

---

12/ Esto será tanto más cierto cuanto más difícil sea -vgr. por razones de localización, mínima masa crítica, etc.- utilizar los servicios del mismo grupo de ingeniería para ambas plantas.

aumento del rendimiento a medida que crece la producción acumulada (o tasa de aprendizaje); (ii) el nivel inicial de rendimiento (correspondiente a una dada producción inicial); (iii) el horizonte de planeamiento; (iv) la tasa de descuento y (v) el rendimiento de la mano de obra de ingeniería de planta. 13/

El rendimiento de planta se medirá en términos de producción por unidad de capital. Este indicador se justifica por la elevada ponderación de los costos fijos en la estructura de costos del tipo de industrias que examinamos (petroquímica, siderurgia, energía, etc.). El rendimiento de la mano de obra de ingeniería de planta se expresará en términos de aumento en el rendimiento de la planta por hora-hombre de ingeniería de planta.

Como se ha visto en el capítulo III, hay dos formas de conceptualizar la condición de diseño. Una se guía por la garantía contractual; esto es, la condición nominal de diseño. Otra es la que se guía por el potencial adaptativo del diseño; se trata, en este caso, de lo que puede denominarse la condición efectiva de diseño. Esta indicará cuál es el máximo nivel de rendimiento (capacidad terminal) alcanzable por la planta. Pero no indica cuándo. El cuándo dependerá de la tasa de aprendizaje. A su turno, esta última será una función del volumen de recursos en ingeniería de planta que se empeñen. 14/

Del trabajo de Baloff 15/ se desprende interesante información respecto de los márgenes de sobrediseño en el caso de 20 procesos y subprocesos distintos en el sector siderúrgico. Nos encontramos aquí que es bastante frecuente que la condición efectiva de diseño diverja de la condición nominal. En algunos casos es holgadamente superior, mientras que, en otros, es considerablemente más baja. La media aritmética del margen de sobrediseño para la muestra de Baloff es de .29, la geométrica .22. Estos coeficientes expresan que, en promedio, el rendimiento efectivo alcanzado por las plantas fue 29 (o 22) por ciento superior al nominal. Es de notar que, a pesar de la importancia que reviste este hecho, Baloff no le presta sino circunstancial atención en su análisis (análogamente a lo que ocurre con la generalidad de los autores que estudian curvas de aprendizaje). 16/

---

13/ En realidad, las variables (i) y (v) no están desvinculadas. A un mayor rendimiento de la mano de obra de ingeniería de planta normalmente corresponderá una tasa de aprendizaje más elevada. Sin embargo, por razones expositivas preferimos distinguirlas. Ver más abajo.

14/ En el análisis que sigue supondremos, para simplificar, que ese volumen de recursos es fijo por unidad de capacidad, aunque su rendimiento variará con arreglo al margen de sobrediseño.

15/ Baloff, N. (1963).

16/ El motivo de este descuido obedece a la creencia de que lo 'normal' es que la capacidad nominal coincida con la capacidad terminal de la planta. Quienes así piensan parecen ignorar que están apoyándose en un supuesto bastante irrealista; esto es, que las condiciones iniciales de diseño están completamente optimizadas.

Otras fuentes independientes también contribuyen a mostrar la persistencia de este fenómeno. Mejoras de proceso permiten a Essochem Europe operar algunas plantas 20 por ciento por encima de la capacidad de diseño. Incluso ha habido quejas de que las mejoras por ruptura de cuellos de botella durante los últimos tres años han elevado de tal manera la capacidad efectiva de las plantas que las estadísticas públicas sobre capacidad ya no son más confiables en la industria química mundial. 17/ Se apunta que la capacidad agregada en virtud de desembotellamientos de plantas de etileno de Europa Occidental basadas en nafta ha equivalido, durante el curso del período 1975-1977, a dos plantas de 500.000 t/a. (la mayoría de las mejoras se han referido a los hornos de craqueo). Cambios en el diseño de reactores posibilitan la obtención de 40-50 por ciento más de producto de las instalaciones de melamina existentes. 18/ Por su parte, Hirschmann 19/ ha estimado que, en 1951, la capacidad efectiva mundial de unidades de crackeo catalítico era de 250.000 m<sup>3</sup>/d, en tanto que su capacidad de diseño ascendía a 190.000. La capacidad efectiva había rebasado la nominal en un 32 por ciento.

Es de lamentar, aunque no de extrañar, la dificultad de obtener información sobre casos de subdiseño. A pesar de ello, la existencia de dichos casos es admitida públicamente por las propias firmas de ingeniería (si bien se adjudican las causas más a fallas en los equipos, o sea, a la responsabilidad de sus fabricantes, que a problemas de diseño). 20/

Si bien es cierto que se advierten distintos márgenes de sobrediseño o, lo que de ello resulta, distintos niveles de máximo rendimiento de planta, dichos niveles discrepantes se ponen de manifiesto al cabo de variables períodos de tiempo. En algunos casos se requieren unos pocos meses, en otros varios años. Para la muestra de Baloff el período medio resultó en alrededor de un año, si bien la varianza es sustancial. Esto implica que, por un lado, se verifica una distribución de márgenes de sobrediseño y, por el otro un rezago distribuido en su explotación. Es del caso apuntar aquí que puede ocurrir que el costo de explotar un margen dado de sobrediseño sea tan elevado que no convenga adoptarlo, 21/ excepto que, debido a imperfecciones en el mercado de información, disparidad negociadora, o a otras causas, no haya otra opción.

De lo anterior se infiere que es preciso analizar las relaciones entre distintas situaciones de rendimiento máximo (o capacidad terminal) atendiendo al tiempo que demande alcanzarlo. Una planta que sólo alcanza un rendimiento

---

17/ Chemical Engeneering, op. cit.

18/ Ibid.

19/ Hirschmann, W.B. (1964)

20/ Cfr.

21/ Por ej., puede tratarse del caso de una planta sobrediseñada cuya instrumentación y control estén programados para operar de manera altamente automatizada. El costo de reprogramación puede llegar a ser mucho más elevado que el beneficio que pueda obtenerse por explotación del margen de sobrediseño.

un 5 por ciento mayor que el de diseño puede convenir más, si lo logra en tres meses que otra que, ceteris paribus, alcance un rendimiento del 25 por ciento superior al de diseño, pero recién al cabo de tres años. Si el período de recuperación del capital es breve, el primer caso puede permitir ya sea un profundo rediseño o el pasaje a otro diseño de la planta, una vez que el menor nivel de eficacia máxima relativa comience a resentir la posición competitiva de la firma.

Supongamos ahora que la planta comienza operando a un cierto nivel de capacidad inicial  $a \cdot x_0$ , donde  $0 < a < 1$  y  $x_0$  es la capacidad nominal. La capacidad inicial crecerá a una dada tasa (que, por simplicidad, suponemos constante), que depende del rendimiento de los esfuerzos de ingeniería de planta, hasta que se alcanza la capacidad terminal  $(1+\phi)x_0$ . Una vez alcanzado ese punto, en el momento  $k$ , la capacidad efectiva cesa de aumentar. A partir del momento  $k$  la capacidad efectiva se mantiene constante año a año hasta el final del período de planeamiento ( $n$ ).

Tomando  $x_0=1$  y suponiendo el precio constante, el beneficio total será, por tanto,

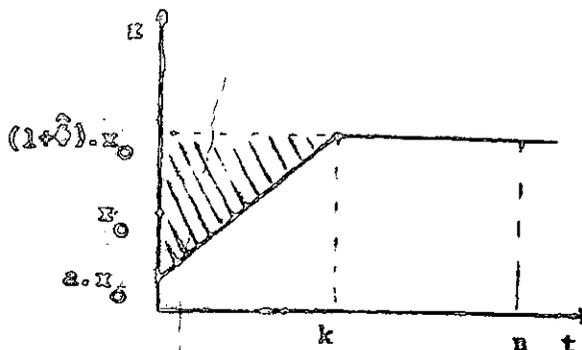
$$B = p \cdot \left\{ (1 + \hat{\phi}) \cdot n \cdot \sum_{t=1}^{t=n} \frac{1}{(1+i)^t} - \frac{1}{2} \cdot (1+\hat{\phi}-a) \cdot k \cdot \sum_{t=1}^{t=k} \frac{1}{(1+i)^t} \right\} - C \quad (1)$$

donde  $C$  representa el costo total (que se incurre al principio),  $i$  la tasa de interés y  $t$  el período de descuento.

El primer término del segundo miembro representa el ingreso total que se habría obtenido si se hubiera operado a la capacidad terminal desde un comienzo. El segundo término expresa cuánto debe deducirse por no haberse alcanzado la capacidad terminal sino hasta el momento  $k$ . 22/

De (1) se desprende fácilmente que el beneficio total está positivamente asociado al margen de sobrediseño (más rentable) y a la longitud del período de planeamiento y negativamente asociado a la longitud del período que demanda alcanzar la capacidad terminal y a la tasa de interés. En otros términos, dado todo lo demás, cuanto más tiempo demanda arribar a la capacidad terminal, menor

22/ Esto puede visualizarse en la siguiente gráfica. El primer término representa la superficie del rectángulo  $(1+\hat{\phi}) \cdot n$  (descontada). A esa superficie es preciso restarle la superficie del triángulo sombreado que es igual a  $(1+\hat{\phi}-a) \cdot k/2$  (descontada), para  $x_0 = 1$ .



es el beneficio de incurrir en sobrediseño. Y, dado lo demás, lo mismo ocurre cuanto mayor es la tasa de descuento.

Lo anterior permite reexaminar la teoría de las curvas de aprendizaje a la luz de las condiciones iniciales de diseño.

Aquellos que analizan distintas aplicaciones de las curvas de aprendizaje, habitualmente se manejan con los respectivos coeficientes sin tener presente que el plateau que eventualmente alcanzan las curvas está asociado a una determinada situación respecto del máximo rendimiento alcanzable. Y que éste, a su turno, depende del potencial adaptativo conferido al proceso por diseño. Dados los esfuerzos de ingeniería de planta, dos distintas versiones del diseño de un proceso pueden permitir alcanzar un similar nivel de capacidad efectiva tras distintos períodos, o bien distintos niveles de capacidad efectiva tras igual período. Pero la tasa de aprendizaje per se no nos dirá cuál versión nos permitirá alcanzar la máxima capacidad efectiva o máximo rendimiento de planta tras cuál período. Faltará información. Esto sugiere que, a los intentos por predecir la pendiente de la curva de aprendizaje, es preciso agregar esfuerzos destinados a conocer por adelantado el potencial de aprendizaje que brinden distintos procesos y diversos diseños de un mismo proceso. Las firmas clientes de empresas de servicios de ingeniería por lo general no tienen sino una vaguísima idea respecto de este último punto (tanto más vaga cuanto más reciente sea el proceso), pero aun así, no la utilizan como parámetro de decisión. 23/ Si bien, como ya se ha visto, los diseñadores de un proceso confrontan genuinas incertidumbres de diseño, mucho hay también de aplicación de criterios discrecionales en la determinación del margen de sobrediseño.

Debe aquí puntualizarse también otro sesgo habitual entre los analistas del fenómeno del aprendizaje que es, en realidad, el motivo fundamental de su despreocupación por los condicionamientos impuestos por el diseño inicial. Tal sesgo reside en la creencia -no avalada por los hechos- de que hay una ley psicológica por la cual los esfuerzos por mejorar la performance técnica de una planta sólo tienen por objetivo alcanzar, no superar, las condiciones iniciales de diseño. Así, por ejemplo, si el rendimiento inicial es muy bajo en relación al de diseño, se redoblarán los esfuerzos para contrarrestar ese bajo punto de partida. En cambio, si el rendimiento inicial se aproxima bastante al de diseño, ya no existirá tanta preocupación por mejorar la planta. En consecuencia, habría una convergencia, psicológicamente motivada con arreglo a la "ley de Weber", hacia las condiciones iniciales de diseño. Esta interpretación implica, ya sea que las firmas propietarias de proyectos se hacen cargo voluntariamente de los perjuicios derivados de diseños subóptimos o bien que todos los diseños ya están debidamente optimizados. El primer supuesto implica falta de racionalidad en la firma cliente, en tanto que el segundo no se compatibiliza con la realidad.

---

23/ Este hándicap en el proceso de evaluación no es privativo de firmas de países en desarrollo, aunque hay buenas razones para se esfuercen más por evitarlo (menor disponibilidad de recursos, mayor inadecuación de los diseños a sus condiciones, etc.)

Por tanto, difícilmente esta interpretación pueda servir de guía para un comportamiento racional. 24/

De nuestro análisis anterior se deduce claramente la influencia del horizonte de planeamiento sobre lo que sería una decisión no miope por parte de la firma propietaria del proyecto (esto es, una decisión fundada en una evaluación previa del potencial de aprendizaje). Dada la tasa de descuento en el tiempo y el costo de inversión, cuanto mayor sea el horizonte de planeamiento, mayor será el período que se esté dispuesto a aguardar hasta tanto se alcance la capacidad terminal y tanto más cuanto más elevado sea el margen de sobrediseño más rentable. E inversamente, dado lo demás, cuanto menor sea el horizonte temporal, mayor será la preferencia por aquellos diseños que permiten alcanzar rápidamente la capacidad terminal. El horizonte temporal de la firma estará afectado tanto por una serie de factores macroeconómicos, políticos, etc., como por la misma rapidez esperada del cambio técnico. Por tanto, un elevado potencial de aprendizaje relativo a un proceso por unidad de tiempo, podrá estimular menores horizontes de planeamiento cuando se trata de un mercado muy competitivo. 25/

En los párrafos precedentes hemos considerado al período que demanda alcanzar la capacidad terminal o rendimiento máximo como un parámetro explícito. En realidad, si se conoce el nivel de capacidad inicial, la tasa de aprendizaje y la capacidad terminal, de hecho ya está definida la longitud de ese período. En efecto, siendo  $\alpha$  la tasa de aprendizaje (esto es, la pendiente de la curva que describe el curso de la capacidad efectiva),  $a$  el nivel inicial de capacidad efectiva y  $(1+\phi)$  la capacidad terminal, el período que demanda alcanzar esta última capacidad será:

$$k = \frac{1 + \phi - a}{\alpha}$$

En otros términos, el período que demanda alcanzar la capacidad terminal es igual a la recíproca de la tasa de aprendizaje multiplicada por la diferencia entre capacidad terminal y capacidad efectiva inicial. Dada esta diferencia,  $k$  variará inversamente a  $\alpha$  y, por tanto, al rendimiento de los esfuerzos de ingeniería de planta.

Dada la calidad del plantel de ingeniería de planta, el rendimiento medio de sus esfuerzos vendrá determinado por el margen de sobrediseño. Esto se sigue del hecho de que ese rendimiento es medido en términos de aumentos en la capacidad efectiva de la planta y de que la máxima capacidad efectiva corresponde a un dado margen de sobrediseño.

---

24/ Ejemplos del uso de estos criterios los brindan los trabajos de Baloff, N., op. cit. y Henderson, R. (1975).

25/ En el análisis anterior podríamos haber expresado la dimensión temporal en términos de producción acumulada en el eje de las abscisas. De esta manera, la curva de capacidad o rendimiento revestiría el significado habitualmente asignado a la curva de aprendizaje.

Por tanto, una vez determinado el margen más rentable de sobrediseño (el cual corresponde al punto en que el costo marginal de producción es mínimo), quedará definida la capacidad efectiva máxima o terminal y, con ella, el rendimiento medio del esfuerzo de ingeniería de planta. Esto no excluye la posibilidad de que, con un mayor margen de sobrediseño pueda lograrse un más elevado rendimiento medio de ese esfuerzo. Sin embargo, el provecho que de ello se extraiga será menor que el costo adicional que deba incurrirse para ampliar el margen de sobrediseño. Para márgenes de sobrediseño inferiores al más rentable, el beneficio económico por aumento en el rendimiento de la mano de obra de ingeniería de planta excederá el costo por sobrediseño y, por tanto, será conveniente optar por un margen más elevado hasta el punto en que ese beneficio iguale al costo del sobrediseño.

Cierto es que los proyectos mejorativos de ingeniería de planta no se sustraen a la incertidumbre. Pero también lo es que, una vez identificados y definidos, implican unos márgenes de incertidumbre muy reducidos, con períodos de repago que se cuentan en meses. Tales márgenes de ninguna manera son comparables con aquellos que se refieren a modificaciones y mejoras a escala de planta piloto, donde es preciso superar multitud de mediaciones antes de verificar la rentabilidad. Desde luego que la incertidumbre no es tan reducida respecto de la pronta y oportuna identificación y definición de los proyectos. Esto depende fundamentalmente de la calidad del plantel de ingeniería de planta. Y dado el nivel de esta calidad, la incertidumbre respecto de la pronta y oportuna identificación y definición de los proyectos adaptativos de mejora será tanto menor cuanto mejor haya sido la evaluación anticipada de los sesgos que revisiten las condiciones iniciales de diseño.

## VIII. APRENDIZAJE EN EL DISEÑO DE PLANTAS

En este capítulo se explorarán algunas dimensiones de un tópico sobre el cual el nivel de conocimiento existente es aun bastante incipiente: el del cambio técnico en el diseño de plantas. Poco es aun lo que se sabe respecto de su naturaleza. Aun más pobre es el conocimiento respecto de su medición. Obviamente, por tratarse de una actividad muy intensiva en el empleo de recursos humanos altamente calificados, tiene una íntima ligazón con la formación de esos recursos (aunque este punto no será analizado aquí). Por otra parte, las consecuencias del cambio técnico en el diseño de plantas, que se expresan directamente en su performance técnica, también merecen mayor atención de la que se les ha prestado hasta el presente.

### VIII.1. Ingeniería de diseño y elección de técnicas

Hemos apuntado más arriba que deben distinguirse dos tipos de aprendizaje que alimentan el sendero de mejora tecnológica de una actividad industrial a través del tiempo.

Uno es el que se refiere al aprendizaje en planta, ya examinado en el capítulo anterior. El fruto de este aprendizaje permite mejorar la performance técnica de planta, dado el proceso y dado el diseño del proceso. Otro es el que se refiere al aprendizaje en el diseño de plantas, para un proceso dado. Ambos son interdependientes.

Una vez originado un nuevo proceso, habrá una nueva experiencia acumulativa para cada diseño sucesivo de ese proceso y para cada planta que resulte de esa sucesión de diseños. El aprendizaje en planta y en el diseño de plantas confluyen con el desarrollo de nuevo conocimiento básico y aplicado para la emergencia de nuevos procesos.

Cuando se hace referencia a sucesivas mejoras introducidas a un proceso dado se están involucrando ambos tipos de aprendizaje; estos se complementan durante el curso de la trayectoria mejorativa del proceso y, eventualmente, coadyuvan a la aparición de una discontinuidad; esto es, a la generación de un nuevo proceso. Así, durante la etapa post-introductoria de un nuevo proceso comienzan a sentarse las bases para la generación del proceso que lo sucederá en el futuro.

Al examinar los criterios de selección entre procesos, se apuntó en el capítulo V la necesidad de estimar su potencial respectivo de mejora con objeto de evitar opciones miopes. Pero es claro que ese potencial de mejora será inversamente proporcional al nivel de la experiencia acumulada respecto del proceso de que se trate. En otros términos, cuanto más elevado sea el nivel de experiencia acumulada respecto de un dado proceso, mayor será el grado en que se haya explotado su potencial de mejora, y menor será, por tanto, el margen de mejora residual. 1/ El margen residual de mejora de una quinta generación de planta, por ejemplo, será con toda probabilidad menor que el que corresponde a una segunda generación para un mismo proceso.

---

1/ Puede hacerse la salvedad de que cambios en el estado del conocimiento respecto del proceso en cuestión pueden afectar ese margen residual de mejora.

Ahora bien; cuando se destacan las ventajas de procesos apropiados para grandes escalas, además de suponerse que se cuenta con un mercado de dimensión suficiente como para permitir la explotación de esas ventajas, también parecería sugerirse que su potencial de mejora es mayor que el relativo a procesos adecuados para escalas pequeñas. Aun cuando no hay razones para excluir a priori esa posibilidad, de ninguna manera es obvio ni probable que lo sea cuando se lo considera en términos residuales. Este punto está muy ligado a la experiencia acumulada por los planteles de diseño. Examinémoslo con mayor detalle.

Si se tiene presente que las economías desarrolladas con amplios mercados concentran el grueso de la capacidad de ingeniería de diseño de procesos y también lo sustancial del mercado de las firmas de ingeniería, puede inferirse un natural sesgo en favor de una mayor explotación relativa del potencial de mejora de procesos apropiados para escalas grandes que del potencial de mejora de procesos adecuados a escalas pequeñas. Es indiscutible que el número de generaciones de planta que se suceden para el primer tipo de procesos es mayor que el concerniente al segundo tipo. Por tanto, el potencial relativo residual de mejora será normalmente menor en el primer caso que en el segundo. Esto sugiere dos cosas. En primer lugar, la existencia de un mayor mercado potencial y una menor experiencia acumulada en el diseño de plantas con procesos adecuados a mercados pequeños en lo que hace al desarrollo de capacidad de ingeniería de diseño en los países en proceso de industrialización. En segundo término, la necesidad de tener en cuenta este sesgo en el patrón de experiencia acumulada y en el potencial residual de mejora, en la selección de tecnología por parte de firmas que operan en esos países. A este punto se retornará más abajo.

## VIII.2. Progreso técnico en el diseño de plantas

Dado que, como queda dicho, el potencial de mejora de un proceso es explotado tanto a nivel de ingeniería de diseño a medida que se suceden generaciones de planta como a nivel de ingeniería de planta para cada generación de planta, es preciso apuntar hacia un análisis agregado de ambos niveles.

En el capítulo anterior se intentó poner de manifiesto cómo un dado nivel de experiencia en el diseño de plantas influye sobre el aprendizaje en planta. Procederemos ahora a analizar la influencia del aprendizaje derivado de sucesivas generaciones de planta a nivel del plantel de diseño, tras considerar previamente acerca de la naturaleza del cambio técnico en el trabajo de diseño.

Ya apuntamos que el estado del conocimiento al respecto es aun mas bien pobre. El standard tradicionalmente utilizado para medir productividad de los elencos de diseño ha sido el número de planos por hora-hombre. Este indicador es bastante insatisfactorio. Por un lado, sólo se aplica directamente para el caso de cierto tipo de trabajo técnico: el que consiste en el trazado de planos. Con todo, podría suponerse que el número de planos producidos por unidad de tiempo, dada la calidad del trabajo técnico de aquellos que directamente los elaboran, depende también de la precisión y eficacia de los cálculos previos que se realicen y, por tanto, constituiría una medida indirecta de la productividad conjunta del elenco de ingeniería. Sin embargo, hay una razón aun más seria para no considerarlo como un indicador adecuado. Se trata del problema de la calidad, no ya de los planos mismos, sino de las condiciones específicas

de diseño de la planta; esto es, del producto final del elenco. Un mismo número de planos, producidos tras una igual cantidad de horas-hombre, puede dar lugar a condiciones de diseño distintas según los criterios de diseño que se hayan implementado (dejando de lado las distintas dotaciones de capital y experiencia con que operen los elencos, lo cual constituye una limitación adicional).

En conclusión, el número de planos por unidad de tiempo puede ser una aproximación muy burda, cuando no una unidad de medida espúreamente homogénea, con alguna validez para el caso de la ingeniería de detalle; esto es, de la fase mas repetitiva y menos creativa del trabajo del elenco. Por tanto, podría ser una proxy mas o menos aceptable para firmas especializadas en ingeniería de detalle, pero en modo alguno para firmas cuyo fuerte resida en la prestación de servicios de ingeniería de procesos, donde la calidad de los cálculos constituye lo fundamental de su producción.

En la búsqueda por indicadores más relevantes, puede optarse por medir la producción -y, con ello, la productividad- de los servicios de ingeniería de diseño en términos de la capacidad que se diseña. En otras palabras, la productividad en este caso se mide como cantidad de horas-hombre requeridas por unidad de capacidad de diseño para plantas de un mismo tipo. 2/

Con este criterio el progreso técnico en la producción de servicios de ingeniería de diseño puede expresarse de las siguientes maneras:

(i) reducción de costos unitarios de diseño por difusión de costos fijos (de la unidad de diseño);

(ii) reducción de costos unitarios de diseño por economías de información (idem);

(iii) reducción de costos unitarios de producción de las plantas diseñadas por mejoras de diseño que permiten explotar economías de escala en las plantas, y

(iv) reducción en los costes unitarios de producción de las plantas diseñadas por reducciones en el margen de sobrediseño.

El caso (i) responde a economías estáticas de escala en la fase del diseño, en tanto que los casos (ii), (iii) y (iv) son consecuencia de economías dinámicas de escala (aprendizaje) en la producción de servicios de inge-

---

2/ Podría objetarse que sucesivas generaciones de planta en la medida que, como es normal, incorporen mejoras de diverso tipo, no deberían ser consideradas como productos homogéneos del plantel de diseño (condición necesaria para medir productividad). Sin embargo, nos manejaremos dentro de un rango de modificaciones lo suficientemente reducido como para que sea lícito considerar las sucesivas plantas que se diseñen como esencialmente análogas. De otra manera, sería imposible cálculo alguno de la productividad de los planteles de ingeniería de diseño, por cuanto las plantas siempre difieren algo. Nuestro criterio de homogeneidad se remite a la condición de que el proceso y los equipos e instalaciones principales sean del mismo tipo y capacidad.

nería de diseño. 3/ Examinémoslas por turno.

La principal manera en que se obtienen economías estáticas de escala consiste en el creciente empleo de métodos cibernéticos, mediante la sustitución de insumos laborales por insumos de capital. Esto se expresa a través de un creciente reemplazo de la mano de obra directa por el empleo de maquetas y el cálculo de isométricas y de materiales por medio del empleo de computadoras (lo cual permite aumentar el rendimiento laboral mediante una mayor dotación de capital por hombre ocupado). 4/

Las economías dinámicas de escala en la producción de servicios de ingeniería de diseño se expresan a través de la reducción de la cantidad de horas-hombre de diseño por unidad de capacidad de diseño a medida que aumenta el número de plantas diseñadas. Como queda dicho, esto puede operarse de tres maneras.

---

3/ En la discusión siguiente se hacen algunos supuestos que conviene especificar aquí. En primer lugar, en todos los casos, se hace el supuesto *ceteris paribus*; esto es, que no hay cambios en las demás variables (vgr. en los costos de inversión en equipo de las plantas diseñadas). En segundo término, se hace abstracción de la influencia que puede ejercer la empresa cliente. Esta puede afectar la condición (y el costo) inicial de diseño al solicitar, por ejemplo, que se ahorre en equipo auxiliar o que se dote a la planta de cierto tipo especial de flexibilidad, alterando así la condición inicial de diseño y su costo. Dado que distintos clientes tendrán diversas preferencias respecto de ese y otros aspectos (mezcla de insumos y productos, calidades mínimas, etc.), las diferencias entre capacidad efectiva y capacidad nominal pueden obedecer a razones muy distintas de la productividad del elenco de ingeniería de diseño.

4/ Pueden distinguirse cuatro fases en este proceso. La primera consiste en el uso de maquetas en lugar de planos, manteniendo el cálculo manual de isométricas y de materiales. La segunda incluye uso de maquetas y cálculo de isométricas por computadora con programas de terceros y cálculo manual de materiales. La tercera comprende uso de maquetas y cálculo por computadoras tanto de isométricas como de materiales con programas de terceros. La cuarta consiste en el uso de maquetas y cálculo por computadora de isométricas y de materiales con programas desarrollados por propia cuenta. En Argentina se está aún en una etapa intermedia. Así, ya se ha generalizado el uso de maquetas. Estas permiten emplear mano de obra de cálculo menos experimentada (y, por tanto más barata); tener desde un principio una visión permanente de cómo va a ser la planta, con lo cual pueden sugerirse oportunas modificaciones durante la marcha del proyecto; detectar interferencias físicas y problemas de espaciamento; y aumentar la eficacia del trabajo de montaje, ahorrándose horas muertas. Dado que la mano de obra de cálculo en Argentina es relativamente barata en términos internacionales, aún no es totalmente rentable realizar los cálculos de isométricas por computadoras (y aún menos desarrollar programas propios). Sin embargo, la paulatina aproximación del costo laboral local al internacional ha ya estimulado a algunas firmas a intensificar el empleo de computadoras, adquirir los primeros plotters, y aún iniciar el desarrollo de programas propios. Se estima que el rezago de Argentina respecto de la frontera tecnológica internacional en la producción de servicios de ingeniería de diseño oscila alrededor de los diez años.

En primer lugar, habrá economías en el costo de diseño por la disponibilidad de información directamente utilizable, a partir de las plantas que ya se han diseñado, para su uso en las plantas subsiguientes. De hecho, desde el punto de vista del costo total de un proyecto, estas economías tienen una reducida ponderación (incluyendo costos de presentación a licitación y preparación de órdenes de compra pueden alcanzar un cinco por ciento de ese costo tras el diseño de ocho plantas sucesivas durante el curso de un año). 5/ Tales economías pueden influir significativamente, empero, sobre el margen de beneficio de la firma de ingeniería (que tenderá a apropiarse el grueso de la ventaja)

En segundo lugar, la creciente experiencia de diseño viene usualmente ligada a la repetición de diseños para plantas con igual proceso pero con escalas crecientes. Estas mayores escalas implican usualmente la introducción de ciertas mejoras que en buena medida se originan en la propia experiencia que usuarios, así como productores de equipo, materias primas y catalizadores les allegan a la firma de ingeniería. Al mismo tiempo, el escalamiento no implica proporcionalmente crecientes insumos de mano de obra de ingeniería de diseño en razón de que, dado el proceso, cuesta aproximadamente lo mismo diseñar para una escala dada que diseñar para una escala un tanto mayor. Por tanto, he aquí otra fuente de reducción en los costos de diseño por unidad de capacidad nominal. La particularidad de este caso, así como del siguiente, es que, aun cuando la firma de ingeniería se apropie del total de este ahorro en costos de diseño, la firma propietaria del proyecto también se beneficiará por la reducción en los costos unitarios de producción que seguirá a las economías de escala que obtengan.

Finalmente, consideremos la última consecuencia del aprendizaje de los plantales de ingeniería de diseño. A medida que se van diseñando sucesivas plantas de un mismo tipo y que, por tanto, el plantel de diseño va conociendo mejor el proceso, se verifica una paulatina reducción en las incertidumbres técnicas de diseño. Esto puede expresarse en el empleo de menores márgenes de seguridad en el diseño. De aquí se siguen dos consecuencias. Por un lado, el costo unitario nominal de inversión se irá reduciendo en razón de que la firma de ingeniería podrá ir entregando diseños con un creciente grado de optimización. Por el otro lado y por la misma razón, la diferencia entre el costo unitario efectivo y el costo unitario nominal de producción de la planta también se irá reduciendo. Por consiguiente, mientras que, para las primeras plantas que se diseñen, su potencial de mejora será grande, el costo en términos de ingeniería de planta será elevado en razón de un elevado margen de incertidumbre técnica; para las últimas plantas diseñadas el potencial residual de mejora será pequeño por cuanto los diseños que se entreguen tenderán a incorporar el estímulo de mejoras derivadas del aprendizaje que, con respecto a las previas generaciones de planta, ganaron los plantales de ingeniería de diseño y de ingeniería de planta; en tanto que el nivel de incertidumbre de estos últimos será reducido. (Obviamente, a esta ventaja deberá considerársela neta de la desventaja de iniciarse con una planta nueva que no podrá ser rápidamente reemplazada por otra planta que incorpore algún importante avance tecnológico que haya finalizado la fase de su desarrollo cuando ya no sea posible incorporárselo en aquella).

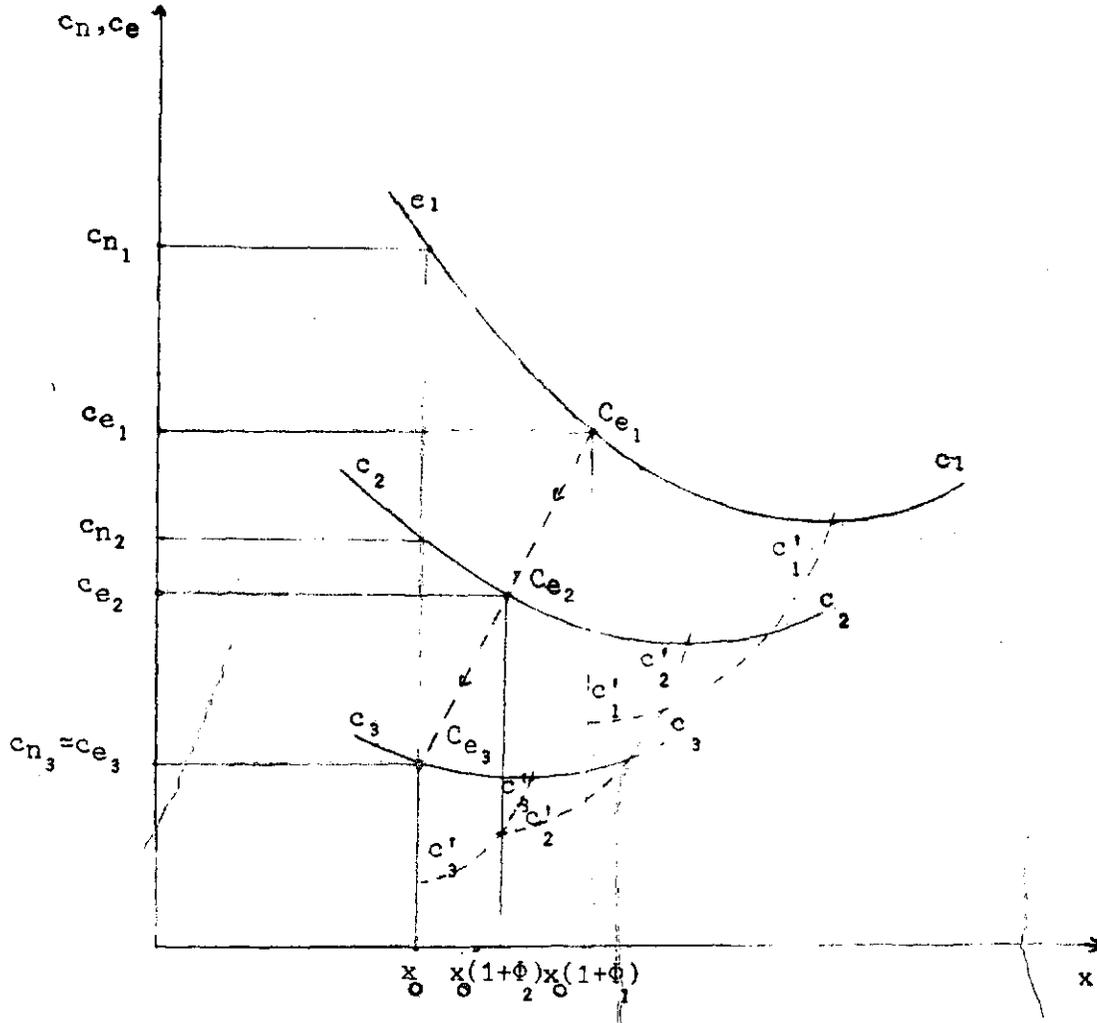
Esta consecuencia del progreso técnico via aprendizaje de los plantales de

---

5/ Cfr. Pratten, C.F. (1971).

diseño puede visualizarse mejor a través del siguiente gráfico.

Gráfico 11



Se supone, para simplificar, que se trata de tan solo tres generaciones de planta. El eje de las ordenadas mide los costos unitarios nominales y efectivos, en tanto que el eje de las abscisas mide la capacidad nominal y efectiva de las plantas. En todos los casos, la capacidad nominal es  $x_0$  (en el gráfico se considera, por tanto, sólo el efecto del aprendizaje de diseño sobre el margen de sobrediseño y, por su intermedio, sobre los costos unitarios de la planta).

La curva de costos unitarios nominales -como función de la capacidad- que corresponde a la planta de primera generación es  $c_1$ . Si en todos los casos se opta por el margen más rentable de sobrediseño y si se abstraer, por simplicidad, la influencia del costo de sobrediseñar (suponiéndosela neutra), el margen de sobrediseño a emplearse en esta planta de primera generación será  $\phi_1$ . Este margen, según se vió en el capítulo VI, corresponde a aquel nivel de

capacidad para el cual el costo marginal de producción es mínimo, tal como lo exhibe la curva  $c_1'c_1'$ . Por tanto, para la planta de primera generación se tendrá un costo unitario nominal  $c_{n1}$  y un costo unitario efectivo  $c_{e1}$  (para operación permanente a plena capacidad), tales que  $c_{n1} > c_{e1}$ .

En la planta de segunda generación las condiciones iniciales de diseño (traducidas por la curva de costos nominales unitarios  $c_2c_2$ ) podrán incorporar las mejoras introducidas en la primera generación de planta a raíz de los esfuerzos de ingeniería de planta y las que se desprendan de la mayor experiencia del mismo plantel de diseño. Las condiciones iniciales de diseño serán entonces más económicas y optimizadas en términos ingenieriles. Esto dará lugar a un costo unitario nominal  $c_{n2}$  para la capacidad  $x_0$  y un costo efectivo  $c_{e2}$ , tales que  $c_{n2} > c_{e2}$ . Dado el menor margen de incertidumbre técnica con que operará el plantel de diseño en esta segunda generación de planta, será  $\phi_2 < \phi_1$  y, por tanto,  $(c_{n2} - c_{e2}) < (c_{n1} - c_{e1})$ .

Finalmente, en la planta de tercera generación, donde el margen de incertidumbre técnica de diseño puede suponerse que haya llegado a ser despreciable, la condición nominal de diseño podrá ser lo suficientemente ajustada como para que el costo unitario nominal sea aproximadamente igual al efectivo, correspondiendo a un margen muy escaso de sobrediseño. El sendero mejorativo quedará entonces expuesto por las siguientes relaciones:

$$\phi_1 > \phi_2 > \phi_3 \rightarrow 0 \quad (1)$$

$$(c_{n1} - c_{e1}) > (c_{n2} - c_{e2}) > (c_{n3} - c_{e3}) \rightarrow 0 \quad (2)$$

Desde luego, lo que importa subrayar aquí son las tendencias, antes bien que los valores absolutos. Por ejemplo, no es preciso que los terceros términos de las inecuaciones sean iguales a cero; aunque sí que se verifiquen las desigualdades en el orden sugerido.

El segmento intermitente flechado  $C_{e1} - C_{e2} - C_{e3}$  describe el curso de los costos efectivos totales correspondientes a las plantas de tres generaciones sucesivas. En el caso particular que estamos examinando en el gráfico, las reducciones en esos costos totales siguen un patrón lineal, aunque desde luego no hay razón necesaria para que así sea. Lo que sí es probable, en cambio, es que las reducciones sucesivas en costos efectivos totales sean decrecientes. Esas reducciones observan dos influencias. Una corresponde a la disminución en el margen de sobrediseño que se sigue de la mayor experiencia del plantel de diseño. La otra corresponde al aumento en el rendimiento de la planta que se obtiene merced al aprendizaje del plantel de ingeniería de planta. La forma de la curva  $C_{e1} - C_{e2} - C_{e3}$  dependerá de la importancia relativa de ambos efectos. De hecho, puede resultar sumamente difícil aislar ambos efectos debido a dos razones. En primer lugar, el plantel de ingeniería de diseño puede beneficiarse por la experiencia que le allegue el elenco de ingeniería de planta y, por tanto, puede sobreestimarse la contribución de aquel plantel

En segundo término, el aporte del elenco de ingeniería de planta en términos de mejoras en la capacidad efectiva depende estrechamente de las condiciones iniciales de diseño; esto es, del aprendizaje acumulado por el plantel de diseño,



(iii) generar una ventaja comparativa internacional en relación a la ingeniería de diseño de procesos apropiados a escalas reducidas;

(iv) promover el desarrollo de un mercado para firmas locales de ingeniería de procesos y productoras de equipo; y

(v) utilizar más económicamente los recursos disponibles.

Al mismo tiempo, e ingresando ya en la esfera de política económica (a ser abordada en el próximo capítulo), el nivel de partida de los países en desarrollo debe permitir un mejor acople del aprendizaje de la ingeniería de planta con el aprendizaje de los planteles de diseño, de manera que estos últimos se beneficien en su desarrollo por la capacidad ya existente en materia de generación de mejoras adaptativas. La facilitación de este acople constituye uno de los aspectos fundamentales que deben ser abordados por una política de promoción al desarrollo de una capacidad autónoma e independiente de ingeniería de diseño de procesos en los países en desarrollo.



## IX. ALGUNAS IMPLICACIONES DE POLITICA

Como paso previo a la breve incursión en el tratamiento de algunas inferencias de política que se encara en este capítulo final, es conveniente puntualizar dos dimensiones del diagnóstico sugerido en este estudio. La primera dimensión se refiere a la interdependencia entre la negociación y la generación de tecnologías. La segunda concierne a la generación de capacidad de ingeniería como producción conjunta de la actividad productiva.

### IX.1. Interdependencia entre la negociación y la generación de tecnologías

El desarrollo de una capacidad independiente de ingeniería de diseño es indispensable no sólo para desarrollar procesos propios, sino también para elegir bien entre procesos ajenos. 1/ La movilización del potencial innovativo interno no resta importancia al proceso de negociación de tecnologías foráneas - al abrir opciones propias -, sino que lo modifica cualitativamente. Permite profundizar el contenido de la negociación con los proveedores extranjeros de tecnología, haciendo posible ejercer no ya el poder de veto, sino también, el poder de opción. El primero permite excluir lo desventajoso; el segundo permite obtener lo ventajoso.

Cuando procesos desarrollados en el exterior son incorporados al país, son sometidos a muchas modificaciones y mejoras a través del tiempo mediante esfuerzos de ingeniería de planta. Este proceso de asimilación reviste un carácter esencialmente adaptativo. El curso del desarrollo adaptativo está sujeto a márgenes de incertidumbre. Estos márgenes son tanto mayores cuanto menor es el conocimiento respecto de dónde reside el mayor potencial de mejora entre procesos y entre operaciones de procesos. Dado lo demás, conviene elegir aquellos procesos donde los esfuerzos adaptativos sean potencialmente más productivos. Dado que el potencial adaptativo de un proceso se define en la etapa de diseño, convendrá supervisar la labor de diseño de modo que se facilite, en lugar de obstruir, la aplicación de esfuerzos adaptativos. Asimismo, habrá un costo asociado al potencial adaptativo que se le confiera al proceso. Esto implica la necesidad de un cálculo económico que confronte dicho costo con el beneficio del esfuerzo adaptativo. Tal tipo de cálculo posibilitará, entre otras cosas, una más racional asignación de fondos para posteriores inversiones en ID a nivel de las firmas. Este tipo de previsiones, de "adaptive technological forecasting", sólo podrá verificarse dentro de márgenes razonables y previsibles de incertidumbre una vez que el desarrollo local de la capacidad experimental y de diseño permita emplear patrones bien establecidos de previsión y ejercer un real control en la fase de diseño

---

1/ En un trabajo reciente, Katz destaca las relaciones de complementariedad existentes entre la contratación de tecnologías extranjeras y la generación de tecnologías propias. Cfr. Katz, J. (1978).

Como una conclusión de un carácter más general, se desprende que el curso de la actividad creativa de ingeniería que se habrá de realizar en el futuro depende de decisiones que se toman hoy. En la medida que, como ha sido usual hasta el presente, no se evalúen los criterios de diseño que definen el potencial adaptativo de los procesos que son incorporados al acervo productivo, el curso del ulterior proceso de aprendizaje y del fortalecimiento de la capacidad innovativa locales quedarán en buena medida sustraídos de la posibilidad de ser orientados en beneficio social.

## IX.2. La generación de capacidad de ingeniería como producción conjunta

El desarrollo de la capacidad de ingeniería surge fundamentalmente como resultado del aprendizaje que acompaña al creciente conocimiento y destreza que se adquieren en relación a los procesos en uso. Así, el desarrollo de la capacidad de ingeniería puede interpretarse como una producción conjunta: esto es; resultante de la propia actividad productiva. <sup>2/</sup>

Para las firmas de proceso, así como para otro tipo de firmas manufactureras, esa producción conjunta de capacidad de ingeniería resulta en realidad un subproducto al cual normalmente no se le inputa un valor económico. Como ya se ha señalado, hay instancias donde las firmas privatizan el beneficio subsiguiente organizando esa capacidad de modo de emplearla no sólo para satisfacer su propia demanda, sino también la de terceros. Pero este no es el caso usual. En la medida que la capacidad de ingeniería que resulta como coproducto de la actividad productiva, pueda ser utilizada - pero no lo sea - para prestar servicios a terceros, sin desmedro de su uso por parte de la unidad económica en cuyo seno se ha generado y a muy bajo costo incremental, se plantea el caso de una externalidad potencial. <sup>3/</sup> El beneficio privado puede entonces resultar menor al beneficio social y ello justifica algún tipo de acción pública. En este caso, se desprende una obvia implicación de política: ¿De qué manera extraer provecho de esa externalidad potencial?

Uno de los aspectos importantes de esta pregunta a los efectos de política se refiere a qué es lo que debe promoverse: la actividad de las firmas de proceso, para que éstas generen indirectamente capacidad de ingeniería; o bien, la de firmas de ingeniería que, a partir de una reasignación de los recursos humanos disponibles, organicen directamente la capacidad existente?

Dado que, necesariamente, la capacidad de ingeniería de diseño requiere de la experiencia que se extrae mediante el uso de los procesos existentes, ambas alternativas son teóricamente válidas. Una de ellas apunta al desarrollo de esa capacidad. Se trata de una estrategia indirecta con frutos en el largo plazo. La otra se dirige a elevar el rédito social del uso de la capacidad existente. Se trata, en este caso, de una estrategia directa, con horizontes más inmediatos,

---

<sup>2/</sup> Por un enfoque similar, ver Rosen, S. (1972).

<sup>3/</sup> Por su mayor conocimiento de las condiciones locales, los planteles de diseño del país podrán tener una clara ventaja comparativa frente a los extranjeros respecto de los atributos adaptativos de los procesos que diseñen.

destinada fundamentalmente a atacar un problema de reasignación de recursos. Claramente, el énfasis relativo sobre una u otra vendrá muy influido por el nivel de experiencia acumulada de que se parta. Si ese nivel es reducido, la estrategia indirecta podrá ser la más indicada; si es elevado, convendrá implementar la estrategia directa.

Surge aún otra pregunta relativa a la estrategia directa. ¿Debería ésta apuntar a la formación de firmas de ingeniería independientes y autónomas o bien, vinculadas a las firmas de proceso? No hay bases a priori para excluir esta última alternativa en la medida que el beneficio que seguiría a la explotación de la firma vinculada para satisfacer demandas que vayan más allá de las del grupo económico del cual depende no sea menor en términos privados que en términos sociales. Para ello sería necesario que no existieran conflictos de interés entre la propia demanda del grupo económico y la de otras unidades productivas. Inclusive, en tanto ese grupo económico estuviese dispuesto a afrontar los costos de aprendizaje y de establecimiento en el mercado de la nueva firma de ingeniería, podría llegar a ser la estrategia más indicada. Por otra parte, podrían haber imperfecciones en el mercado de información - vgr. trabas al acceso a conocimientos de proceso para firmas de ingeniería no vinculadas -, que dificulten un camino alternativo. Las relaciones entre imperfecciones, apropiabilidad y política de promoción serán ahora consideradas en más detalle.

### IX.3. Imperfecciones, apropiabilidad del conocimiento y política de promoción

Mientras que las imperfecciones y distorsiones de mercado pueden dar lugar a fundamentar diversos tipos de intervención gubernamental la existencia de beneficios sociales del aprendizaje no apropiables privadamente constituye una base aceptada para fundar una política de promoción en términos del argumento de la industria incipiente. 4/ Aquí conviene realizar algunas distinciones.

El aprendizaje tecnológico en sí constituye una actividad creativa. Esa creatividad se expresa en la generación de los siguiente productos del aprendizaje:

- (i) activos tecnológicos relativos a innovaciones menores;
- (ii) experiencia y conocimientos de un carácter específico;
- (iii) experiencia y conocimientos de un carácter general.

La actividad de ingeniería de planta genera frecuentemente modificaciones y mejoras que constituyen activos tecnológicos para la firma, más allá de que puedan o no expresarse en títulos de propiedad industrial reconocidos. Así, pueden dar lugar a la registración de patentes o diseños o, alternativamente, mantenerse como conocimientos secretos de la firma. Su valor comercial será tanto mayor cuanto mayor sea su transferibilidad, tanto en términos del grado de generalidad de su aplicación posible como de la medida en que sean expresados en forma transferible. Su grado de apropiabilidad es prácticamente absoluto cuando su titulari-

---

4/ Cfr. Johnson, H. (1965) y (1970).

dad y uso es exclusivo por sanción legal - sin perjuicio de que puedan ser licenciados por una contraprestación que permita al titular apropiarse de todo el beneficio social subsiguiente.

El segundo de los productos del aprendizaje tecnológico consiste en la experiencia y pericia de carácter experimental relativos a problemas específicos a un proceso particular; vgr., cómo optimizar ese proceso bajo condiciones de un equilibrio termodinámico sujeto a ciertas cotas delimitadas; cuáles son las dificultades que se presentan cuando los niveles de filtración exceden cierto límite; cuándo debe reemplazarse un intercambiador de calor de cierto tipo; etc.

El tercer producto del aprendizaje tecnológico está constituido por conocimientos y destrezas aplicables más allá del proceso y de la planta particulares donde ellos se desarrollan. Tal el caso, por ejemplo, de conocimientos relativos a criterios útiles para trazar un lay-out de planta, para la realización de actividades de mantenimiento, para encarar problemas de corrosión o de discontinuidades operativas, etc.

Los activos tecnológicos expresan conocimientos e información materializados bajo la forma de determinadas mejoras y modificaciones del proceso que son propiedad de la firma. Los otros dos casos se refieren a conocimientos y destrezas que se expresan en capacidades incorporadas en el personal técnico de la firma.

Si se observan los tres productos del aprendizaje en el orden expuesto, se notará que expresan niveles crecientes de transferibilidad. Al mismo tiempo, representan niveles decrecientes de apropiabilidad. Así, una mejora dada del proceso puede tener cierta aplicabilidad para otras plantas, pero el provecho de su aplicación a éstas podrá ser plenamente privatizado por quien la originó en la medida que pueda valerse de una titularidad aceptada y/o legalmente sancionada. En contraste, el conocimiento y la pericia que miembros del plantel ingenieril de la firma hayan ganado en relación, por ejemplo, a estrategias para la detección y ruptura de cuellos de botella, serán para la firma de una apropiabilidad muy limitada ante el derecho de esos miembros de emplearse en otras firmas y beneficiarlas con sus conocimientos y experiencia de carácter general y aún de carácter específico, aunque les estará vedado transferirles los conocimientos legalmente apropiados por sus anteriores empleadores.

Es claro que los límites entre estos diversos tipos de información pueden llegar a ser un tanto oscuros y de difícil corroboración en la práctica. Sin embargo, una cosa es cierta. La experiencia, conocimientos y destrezas de carácter general y, hasta cierto punto, los de carácter específico, constituyen el germen de una capacidad de ingeniería de diseño que, por su gran transferibilidad y escasa apropiabilidad, plantean un claro caso para el ejercicio de una política de promoción fundada en el argumento de la industria incipiente.

Hay razones para pensar que los instrumentos de una tal política deberían consistir esencialmente en el otorgamiento de subsidios a la formación y organización de la capacidad local de ingeniería, por cuanto el empleo de tarifas muy probablemente acarrearía mayores costos para los usuarios de servicios de ingeniería que beneficios para los proveedores locales de esos servicios, de modo que el saldo

neto podría ser negativo en términos sociales. 5/

Finalmente, hay una pregunta de la cual es difícil substraerse toda vez que se considera el tema de la acción protectora y promocional del poder público en términos del argumento de la industria incipiente. Protección, sí; pero, por cuánto tiempo? Cuál debería ser el horizonte de una política de ese tipo? 6/

Para responder a esta pregunta conviene distinguir entre el proceso de aprendizaje en el seno de firmas de proceso y el aprendizaje en el seno de las firmas de ingeniería. El primer tipo de aprendizaje tiene, como ya se ha observado, ciertos límites claramente discernibles. Estos límites están referidos al horizonte de los conocimientos adaptativos relativos a plantas específicas cuyo potencial de mejora llega a ser explotado al punto de saturación luego de una determinada cantidad de años. Luego, el agotamiento del potencial adaptativo de una planta puede adoptarse como una vara de medida del periodo adecuado de promoción del aprendizaje de ingeniería en el seno de las formas de proceso. Para ello, pueden implementarse indicadores referidos a medias estimativas del periodo necesario para alcanzar ese agotamiento según el tipo de plantas.

El aprendizaje en el seno de las firmas de ingeniería reviste un carácter menos circunscribible por cuanto no se expresa, como en el caso anterior, en la explotación de un potencial adaptativo específico, sino en la capacidad de generarlo en la fase de diseño. La curva de aprendizaje en este caso es mucho menos conocida. Será preciso ahondar en el estudio de los determinantes del cambio técnico en el trabajo de diseño mucho más de lo que se ha hecho hasta ahora antes de obtener respuestas satisfactorias en este sentido.

Cabe finalmente puntualizar que una política de promoción de la capacidad organizada e independiente de ingeniería no puede sustraerse de la distinción entre nacionalidades. En la medida que las firmas de ingeniería transnacionales que establecen capacidad local poseen un sesgo - y una ventaja - en realizar ingeniería de diseño en el exterior, deben establecerse ciertas preferencias para las firmas locales y/o ciertos desincentivos para que las firmas extranjeras modifiquen sus preferencias en ese sentido. Ello implica la determinación de ciertos indicadores ad-hoc para distinguir entre firmas de ingeniería locales y extranjeras (vgr. respecto de dónde reside su control efectivo).

---

5/ Dadas las arraigadas preferencias de los usuarios por recurrir a los servicios de prestigiosas firmas internacionales de ingeniería, la inelasticidad de la demanda por esos servicios es elevada.

6/ Al plantearse la respuesta a esta pregunta es preciso dejar de lado el efecto de las distorsiones de mercado y centrarse solamente en el fenómeno de aprendizaje, por cuanto el primero no es relevante a los efectos del argumento de la industria incipiente. Desde luego, que ello no implica que esas distorsiones no deban considerarse al planearse el diseño de una política promocional. La ya consignada preferencia por servicios de diseño de firmas internacionales, los sesgos en la evaluación del riesgo por parte de las firmas propietarias del proyecto, las imperfecciones en el mercado financiero, etc., pueden objetivamente trabar el desarrollo de una capacidad local organizada de ingeniería de diseño - ver Serco-vich, F.C. (1977).



## APENDICE A

### PGM

#### 1. Secuencia de procesamiento

El complejo para la producción de aromáticos consta de ocho plantas o secciones; a saber: (i) reforming (reformación catalítica denominada Magnaforming); (ii) extracción de aromáticos; (iii) hidrodealquilación (proceso término denominado HDA); (iv) cristalización de para-xileno; (v) isomerización (proceso denominado Octafining; (vi) ciclohexano, (vii) fraccionamiento de aromáticos y (viii) compresión y purificación de hidrógeno.

#### 2. Descripción del proceso:

(i) Reforming: la materia prima es un corte de nafta cruda proveniente de la destilería próxima. En la sección Magnaforming se procede al afinamiento del corte recibido a fin de que cumpla las especificaciones de la curva de destilación. Así tratado, es reformado también catalíticamente, a altas temperaturas y presiones, para acrecentar el octanaje y/o convertir hidrocarburos nafténicos y/o alifáticos en aromáticos. Este proceso es cumplimentado en presencia de hidrógeno. Incluye el hidrotreamiento catalítico de la carga de nafta para remover su contenido de azufre. La especialización del proceso constituye una mejora técnica reciente debida al desarrollo de catalizadores sólidos bimetálicos. Estos permiten operar en condiciones especialmente favorables para las fracciones de aromatización. El proceso se lleva a cabo en un sistema de cuatro reactores en serie. Debido a que la reacción es endotérmica, se deben proveer calentamientos intermedios por 25 millones de kcal/h. Los calentamientos se efectúan en un único horno tipo "caja" de alto rendimiento, cuya sección de convección produce, adicionalmente, vapor de alta presión. El reformado, una vez estabilizado y enfriado, pasa a la sección Extracción, donde se separan aromáticos de no aromáticos con un solvente selectivo. El catalizador fue desarrollado, elaborado y provisto por Engelhard en tanto que el proceso fue desarrollado por Atlantic Richfield Co.

(ii) Extracción de aromáticos: Para la extracción propiamente dicha se utiliza un equipo denominado Rotating Disc Contactor. Este consiste en una columna provista de un eje central con discos, que gira a velocidades moderadas, para mejorar el contacto entre el solvente y la carga. La operación se efectúa en contracorriente. El extracto aromático es enviado luego a una torre donde se separa el solvente. Este es reciclado a la columna extractiva. El proceso ha sido desarrollado y es operado por Atlantic.

(iii) HDA: Parte del tolueno producido se utiliza como materia prima para fabricar benceno adicional mediante una hidrodealquilación por vía térmica. El tolueno, juntamente con el H<sub>2</sub> producido en el complejo alimentan al reactor de hidrodealquilación. La reacción es altamente exotérmica; para controlar la temperatura, que asciende hasta los 600°C, se realizan inyecciones frías de hidrógeno en distintos puntos del reactor. Este equipo está especialmente diseñado para operar en presencia de H<sub>2</sub> a esa temperatura, para lo cual se utilizan aceros especiales al molibdeno. Esta sección del complejo produce una corriente de benceno que es purificada con arcilla y reciclada al tren de frac-

cionamiento. Este proceso térmico fue desarrollado por HRI y Atlantic e incluye derechos de patente de Esso Research and Engineering Co.

(iv) Cristalización de p-xileno: De una de las torres del tren de fraccionamiento se obtiene una mezcla de xilenos que es enviada a la sección de Cristalización para obtener por esa vía p-xileno al 99,5 por ciento. Ello obedece a que, por la proximidad de los puntos de ebullición de otros isómeros del p-xileno, no es posible su separación por simple fraccionamiento, pero sí por cristalización, debido a la diferencia en los puntos de congelamiento. La cristalización se efectúa en dos etapas: en la primera se alcanzan temperaturas del orden de los  $-80^{\circ}\text{C}$ , obteniéndose cristales que luego de centrifugados y fundidos se introducen en la segunda etapa para obtener mayor pureza; en ésta etapa se opera a temperaturas de  $-14^{\circ}\text{C}$ . Los medios refrigerantes utilizados son el etileno a ebullición para la primera etapa y propano a ebullición para la segunda, operados de acuerdo a ciclos frigoríficos convencionales. A esas temperaturas se utilizan aluminio, acero ASTM-304, ASTM-A-203 y bronce ASTM-147-52-8A. Este proceso fue desarrollado y es operado industrial y comercialmente por Atlantic.

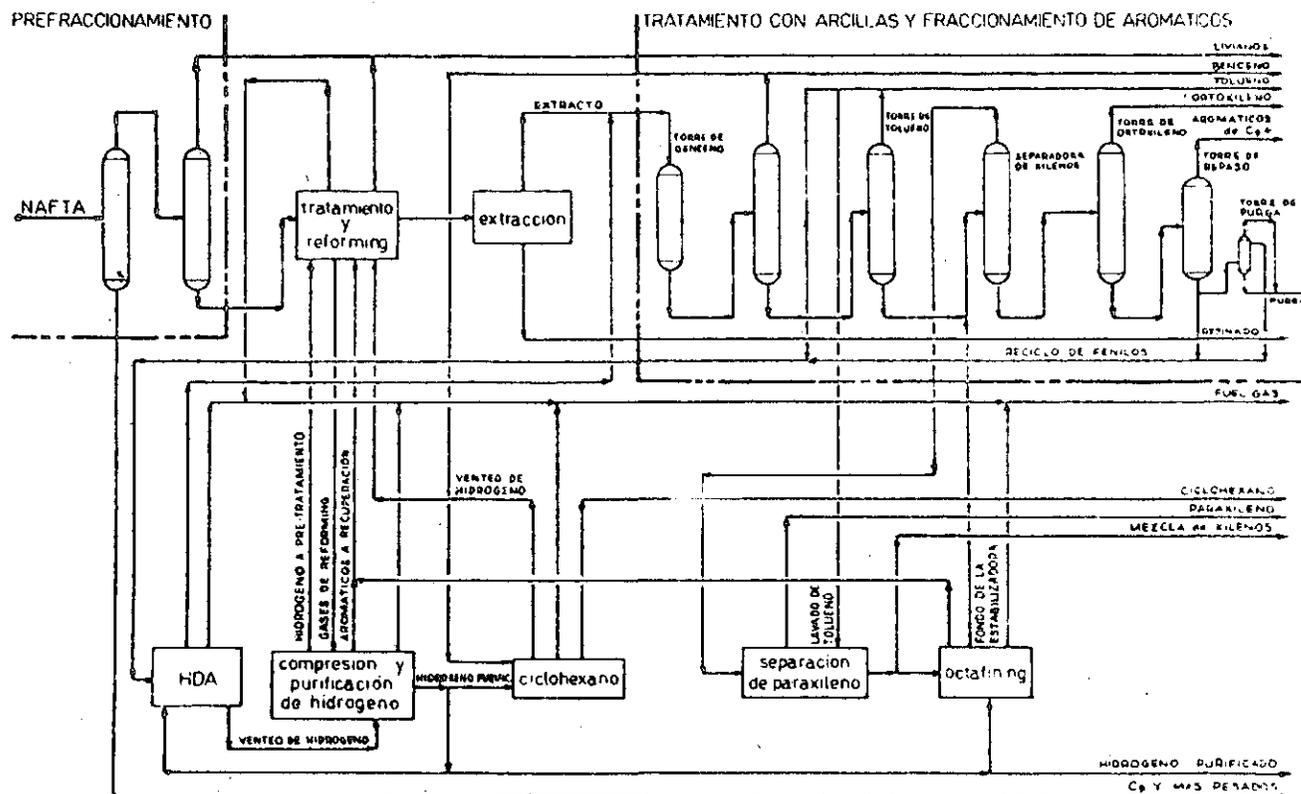
(v) Octafining: el filtrado proveniente de la centrifugación es enviado a la sección de isomerización con el objeto de aumentar la producción de p-xileno, a expensas de otros isómeros de menor valor comercial. La reacción tiene lugar en presencia de  $\text{H}_2$ , en un reactor catalítico de lecho fijo. El efluente de esta planta es reciclado al tren de fraccionamiento. Este proceso fue desarrollado y es elaborado y provisto por Engelhard.

(vi) Ciclohexano: parte del benceno en especificación se destina a la fabricación de ciclohexano (materia prima básica para la fabricación de caprolactama). El benceno es hidrogenado a temperaturas y presiones elevadas en presencia de un catalizador sólido. La exotermia del proceso es aprovechada para la generación de vapor a media presión. El proceso fue desarrollado y es explotado industrial y comercialmente por Atlantic. El catalizador fue desarrollado y es elaborado y provisto por Engelhard.

(vii) Fraccionamiento: La corriente de aromáticos, libre de solvente, es purificada por contacto con arcillas especiales y luego pasa al tren de fraccionamiento. Aquí se obtienen benceno, tolueno y o-xileno en especificación, además de mezcla de xilenos. En total, las torres de este tren son siete. Las bandejas de las torres son de acero especial S.S. 410, a fin de aligerar su peso y asegurar el normal funcionamiento de estos equipos. Proceso desarrollado y explotado industrial y comercialmente por Atlantic.

(viii) Compresión y purificación de hidrógeno: Como se vió, el hidrógeno es indispensable para los procesos HDA, isomerización y ciclohexano. Debido a que los gases generados durante la reformación son ricos en este elemento, se aprovechan, previa compresión y purificación, para satisfacer todos los requerimientos del complejo, y aun queda un cierto margen disponible para eventuales usuarios. La compresión es realizada en dos etapas por dos compresores centrífugos accionados por una turbina a vapor. Esta condensa 9.400 Kg/h. de vapor de alta presión. Luego, la corriente de hidrógeno impuro es secada mediante absorción en secadores de gel de alúmina. Posteriormente, ingresa a la "caja fría", donde se produce la purificación mediante un proceso criogénico. El enfriamiento necesario se logra por "efecto Soule" de los mismos gases que componen la corriente a purificar. Proceso de Lotepro.

# ESQUEMA DE PROCESOS DE PETROQUIMICA GENERAL MOSCONI



Los servicios auxiliares requeridos por el complejo incluyen: 100 millones de Kwh/a de energía; 1 millón t/a de vapor de alta presión; 100 millones de m<sup>3</sup>/a de agua de enfriamiento y 20 millones de m<sup>3</sup>/a de aire comprimido. El combustible para el proceso y para generación de vapor es autoabastecido por los gases residuales, aunque también es posible quemar fuel-oil. La torre de enfriamiento, de tiraje natural, fue realizado en una cáscara de hormigón armado de 14 cm. de espesor, 85 m. de altura y 70 m. de diámetro en la base con una capacidad de 21 millones de litros por hora de agua. La potencia total de compresión de gases asciende a 10.700 Kw en toda la planta.

### 3. Financiamiento

La inversión total (745 millones de pesos de 1974) se financió de la siguiente manera: un 27 por ciento fue aportado por las dos empresas públicas titulares del capital (YPF y FF.MM.); un 17 por ciento fue aportado por el Eximpor Bank de los EE.UU. y el Chase Manhattan Bank; el 59 por ciento restante correspondió a varias entidades bancarias estatales. La relación capital propio a capital de préstamo fue, por tanto, 1 a 4 aproximadamente. Un 60 por ciento del valor de los equipos fue provisto localmente.

### 4. Forma de contratación

La firma propietaria del proyecto es una Sociedad Anónima de capital estatal. La selección de los proveedores del proceso y de los de ingeniería se llevó a cabo mediante un llamado a concurso de ofertas dividido en dos partes; a saber, una referida a la provisión de procesos e ingeniería básica, y la otra a la provisión de la ingeniería de detalle, construcción y montaje. En el pliego de llamado a concurso se estableció taxativamente (fue preparado por el propio personal de la empresa):

- (i) La distribución de los productos requeridos (con cotas mínimas y máximas);
- (ii) los índices de precios unitarios a ser empleados en los cálculos;
- (iii) las especificaciones de los productos a obtener (grado, pureza, peso específico, índice refracción, volatilidad, etc);
- (iv) características y análisis típicos de las naftas de Topping a usar como carga (rangos de destilación, densidad, octanaje, contenidos de azufre, y aromático, nafténico, parafínico y olifínico);
- (v) servicios auxiliares disponibles y a los cuales se debían adecuar las plantas;
- (vi) coeficientes de amortización y de seguro;
- (vii) jornales para personal de operación (ayudantes, operadores, supervisores de planta);
- (viii) análisis medio del gas de refinería;
- (ix) garantías de oferta y adjudicación;

- (x) capacidades y características de las plantas requeridas;
- (xi) requisitos para la integración entre las plantas (operación combinada; con regímenes y condiciones operativas armónicas y económicas; autosuficiencia de hidrógeno). (Las condiciones del encadenamiento preciso entre las plantas y los movimientos del flujo quedaron librados a los oferentes);
- (xii) criterios para la distribución del conjunto de plantas (centralización del control; comando automático; intercambiabilidad operativa de los equipos de reserva; eficiente lay-out; autosuficiencia energética; operatividad; funcionamiento en línea o cadena de modo que el sistema funcione como una unidad combinada);
- (xiii) forma de cotización de la ingeniería básica (ajuste alzado absoluto) y contenido de esa prestación (diagramas de flujo, diagramas de cañerías e instrumentos, plot plan, especificaciones de consumos y equipos). Idem respecto de servicios auxiliares;
- (xiv) servicios complementarios requeridos por parte del proveedor de la ingeniería básica (asesoramiento respecto de facetas técnicas de las propuestas relativas a provisión y montaje de instalaciones; supervisión responsable de la ingeniería mecánica; dirección técnica superior responsable de la puesta en marcha);
- (xv) información requerida junto con la cotización (procesos seleccionados y compañías licenciadoras; antecedentes de los procesos; número de unidades instaladas; capacidades; años de operación; regulías y su forma de pago; costo, consumo y sistema de regeneración de catalizadores; consumos de productos químicos; inversión estimada total y por planta desagregada por conceptos tomando como referencia una localización en Europa Occidental; consumos de vapor, energía eléctrica, etc.; mano de obra requerida para operación y mantenimiento; rentabilidad a regímenes mínimos y máximos; programa de puesta en marcha);
- (xvi) requisitos para los oferentes (oferta unificada aun cuando se complementen con procesos de terceros; previa adjudicación de instalaciones ya en funcionamiento de importancia similar);
- (xvii) condiciones y forma de pago; plazo de entrega; forma de los contratos;
- (xviii) contratación de la ingeniería mecánica, provisión de materiales y montaje de instalaciones (libertad de la firma propietaria del proyecto para contratar estos servicios; inhibición al adjudicatario de la ingeniería básica para prestar estos servicios y/o proveer equipos en forma directa o indirecta);
- (xix) adjudicación (discrecional), y
- (xx) legislación aplicable (del país recipiente).

Se recibieron varias propuestas (5). Entre aquellas que se ajustaron a las especificaciones del pliego (particularmente en cuanto a la mezcla deseada de insumos y productos) se eligió la de menor costo. La segunda propuesta

presentada en cuanto al ranking de costos era inapropiada por la mezcla de productos y subproductos que contemplaba, como así también por las características de destilación de la materia prima. Las demás propuestas eran mucho más caras y/o no presentaban ventajas técnicas.

Se arribó así a la celebración de un contrato para la provisión de la ingeniería básica, servicios de puesta en marcha y servicios complementarios con Hydrocarbon Research Inc. y a un contrato simultáneo de licencia de procesos con Engelhard Minerals & Chemical Corp. Como se desprende de lo visto más arriba, el contrato de licencia incluye ítems de tecnología propietaria de terceras firmas que no participaron directamente de los acuerdos (Atlantic Richfield Esso Research and Engineering Co., etc.). A su vez, HRI celebró un acuerdo previo con el licenciador y con Atlantic que lo capacitó para utilizar la tecnología de la cual esas firmas son titulares o sublicenciatarias.

La formación práctica del personal técnico y ejecutivo local que habría de hacerse cargo de la operación del complejo fue provista con una estadía de ocho meses en Estados Unidos. Durante ese período ocho miembros del plantel superior de la empresa visitaron las plantas de Hydrocarbon Research, Arco, Liquid Carbonic y Engelhard. En esa oportunidad, pudieron revisar planos y detalles de la ingeniería básica y del diseño. A ello siguió otra visita de personal técnico a Estados Unidos para adentrarse respecto de detalles de laboratorio, mantenimiento y seguridad. También se realizó una visita a la planta de UNIAO de Brasil.

Ocho meses más tarde, se celebró el contrato con la firma seleccionada para realizar la ingeniería de detalle, provisión, construcción y montaje de la planta (A.G. McKee Argentina S.A.). Las prestaciones incluyen la ingeniería de detalle de las obras civiles, instalaciones mecánicas, cañerías, equipos, instalaciones eléctricas e instrumentación-suministro de materiales, equipos e instalaciones de procedencia local y extranjera; y la ejecución de todos los trabajos de obras civiles y montaje. El contratista firmó un acuerdo de confidencialidad con el licenciador. El costo de la ingeniería de detalle se determinó en cantidad fija e invariable. Para los demás costos se fijó un precio básico global ajustable. En abril de 1972 comenzó la construcción de la planta y la puesta en marcha se produce meses más tarde, con arreglo a lo convenido.

##### 5. Condiciones iniciales de diseño

Las condiciones de diseño (que se adecuaron sustancialmente a las especificadas por el pliego de llamado a concurso) incluyen en sus rasgos esenciales:

- características de las naftas de topping a usar como carga;
- especificaciones mínimas de los productos;
- capacidades de diseño de las distintas secciones o plantas del complejo;
- rendimiento del proceso;
- rendimiento y vida útil de los catalizadores, y
- especificaciones de los equipos y materiales principales.

Los principales factores de sobre y subdiseño identificados con posterioridad a la puesta en marcha fueron (por definiciones ver Capítulo II):

- disponibilidad de un corte más rico en aromáticos del que se tomó como base para el cálculo de los rendimientos (SD);
- asignación de sólo un 5 por ciento del monto autorizado de inversión co-

mo fondo para repuestos (SD);

- desbalances en la indivisibilidad y especificación de los equipos, con la capacidad de los equipos limitativos suficiente como para aproximar la capacidad de diseño (SD);

- la elevada proporción de capital de préstamo frente a capital propio condujo a una excesiva economización en materia de equipos auxiliares (SD);

- posibilidad de operar los catalizadores a temperaturas más elevadas que las previstas (SD);

- posibilidad de ensanchar los márgenes de seguridad operativa (SD)

- posibilidad de reemplazo de nitrógeno por anhídrido carbónico en la sección de cristalización (SD).

- excesivos márgenes de seguridad en algunos equipos (SD).

Cabe consignar que, ya antes de la puesta en marcha se modificaron las condiciones de diseño en lo que respecta a: (i) el balance de vapor y (ii) a las especificaciones de los equipos con objeto de adecuar su provisión local a la legislación de comercio nacional.

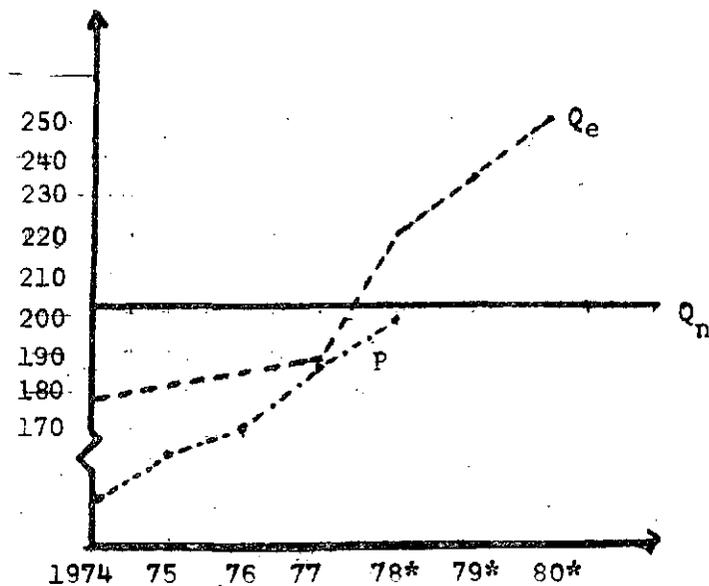
## 6. Performance técnica y esfuerzos de ingeniería de planta

Dadas las condiciones de demanda, la performance técnica de la planta puede expresarse en términos del saldo neto que, a partir de los esfuerzos de ingeniería de planta, resultó de la confluencia de los distintos factores de sub y sobrediseño consignados.

Durante el período de referencia, si bien hubo algunas dificultades con la provisión de materia prima y, en especial, de energía, ellas fueron pasajeras y no asumieron mayor significación desde el punto de vista del ritmo operativo en términos anuales. La planta se dimensionó para atender el nivel de demanda a cuatro años vista, habiéndose procurado un grado óptimo de sobrecapacidad. Por tanto, se previó desde un comienzo un bajo aunque creciente coeficiente de utilización durante los primeros cuatro años de operación. Esto significó que se ejerció poca presión sobre las condiciones iniciales de diseño. Pero a medida que se fue alcanzando la capacidad de diseño, los esfuerzos de ingeniería se hicieron más imprescindibles, primero, para contrarrestar los efectos de los factores de subdiseño (escasez de equipos auxiliares, particularmente) y, segundo, para explotar los márgenes derivados de los factores de sobrediseño. Tomando como indicador no la producción efectiva sino la capacidad efectiva (aquella que la planta podía alcanzar en el corto plazo de manera más o menos permanente en ausencia de anomalías en el suministro de materias primas y servicios) se observa lo siguiente: durante los primeros cuatro años se alcanzó el 93 por ciento de la capacidad de diseño (diferencia lo suficientemente pequeña como para que permita decir que se alcanzó esta capacidad); en el quinto año, la capacidad efectiva supera en un nueve por ciento la nominal; en el sexto lo hará en un 16 por ciento y, a partir del séptimo año, la capacidad original de diseño será superada en un 25 por ciento. En otros términos, puede afirmarse que, hasta el cuarto año de operación incluido, prevalecieron los factores de subdiseño en tanto que, a partir del quinto año de operación se extrae creciente ventaja de la explotación de los factores de sobrediseño a partir de los esfuerzos de ingeniería de planta. Los principales de ellos consistieron en:

(i) sustitución de compresores de la sección HDA, de una torre de la sección extracción y de los autoexpansores de la unidad purificadora de H<sub>2</sub>

Gráfico 1



Q<sub>e</sub> : capacidad efectiva

Q<sub>n</sub> : capacidad nominal

P : producción

\* : estimado

(durante el primero y segundo año de operación);

(ii) optimización del reforming (tercero y cuarto años);

(iii) optimización de la planta de ciclohexano (idem);

(iv) remodelación integral del tren de regeneración del solvente (idem);

(v) debottlenecking en todas las plantas (tercero, cuarto y quinto años).

Estas modificaciones y mejoras permitieron:

- reducir consumos específicos (iix y iv)
- reducir costos de mantenimiento (v)
- reducir consumo unitario de energía (v)
- aumentar continuidad operativa (v)
- aumentar la capacidad de la planta (i,ii,iii)

En síntesis, se obtuvieron menores costos unitarios para niveles dados de

operación y un aumento de la capacidad efectiva de la planta a partir de la modificación y superación de las condiciones iniciales de diseño. Los esfuerzos de debottlenecking incluyeron, particularmente, sensibles mejoras en el lay-out de las plantas.



## APENDICE B

### Petrosur

#### 1. Secuencia de procesamiento

Se trata de una planta químicamente integrada, destinada a la producción de fertilizantes nitrogenados y mezclas, utilizando gas natural como principal materia prima. El complejo está integrado por cinco plantas (o secciones) interconectadas, de las cuales dos producen básicamente insumos intermedios (amoníaco y ácido sulfúrico) y las tres restantes productos terminados (urea, sulfato de amonio y fertilizantes nitrogenados, potásicos y superfosfatos). El complejo incluye también una unidad productora de bolsas de polietileno altamente automatizada.

#### 2. Descripción del proceso

(i) Unidad amoníaco: previa eliminación de azufre, el gas natural se transforma, en presencia de catalizadores, en gas de síntesis. Primero se lo reacciona con vapor (reforming primario) y luego con aire comprimido (reforming secundario). Seguidamente se lo trata catalíticamente para eliminar el CO y los residuos de CO<sub>2</sub>. El gas de síntesis es comprimido hasta 360 kg/cm<sup>2</sup> por medio de tres motocompresoras accionadas a gas natural. En el reactor de síntesis se verifica la formación del amoníaco en presencia de catalizadores. El amoníaco, una vez condensado y enfriado, es decantado en tanques y enviado a almacenaje en tanques esféricos.

(ii) Unidad urea: el amoníaco y el CO<sub>2</sub> procedentes de la unidad de amoníaco son comprimidos a 230 kg/cm<sup>2</sup> y enviados al reactor junto con la solución de carbamato de amonio que es reciclada. La solución que sale del reactor es luego descomprimida y concentrada hasta obtener urea cristalizada. Los gases residuales son enviados directamente a la unidad de sulfato de amonio. La urea cristalizada se envía a la torre de aperdigonamiento, donde es fundida por calor y transformada en perdigones al caer sobre una corriente de aire ascendente. Luego es enviada a embolsado.

(iii) Unidad ácido sulfúrico: es del tipo de contacto. Se funde el mineral de azufre de 99 por ciento de pureza y después de filtrado se lo envía a un horno de combustión donde se transforma en anhídrido sulfuroso. A renglón seguido, por oxidación, se lo convierte en anhídrido sulfuroso y, finalmente, por agregado de agua, en ácido sulfúrico concentrado al 98 por ciento.

(iv) Unidad sulfato de amonio: los gases residuales recibidos de la unidad de urea y el ácido sulfúrico son enviados a un reactor donde se forma una solución de sulfato de amonio. Esta es enfriada y enviada a un cristallizador al vacío. La pasta de cristales es centrifugada y los cristales enviados a secadores rotativos y de allí a almacenaje y embolsado.

(v) Unidad mezcla de fertilizantes: utiliza un granulador a tambor con inyección de amoníaco, en serie con un horno secador, clasificadores, clasificadores por tamaño, enfriador y planta de embolsado.

### 3. Forma de contratación

Se trató de un contrato "llave en mano" con Mitsubishi Heavy Industries sobre la base de conocimientos de proceso e ingeniería básica de Chemical Construction Corporation (CHEMICO). La empresa propietaria del proyecto (joint-venture entre capitales privados locales y extranjeros) realizó un concurso privado de ofertas. Eligió a Mitsubishi por su experiencia como constructora, su gran respaldo financiero y las condiciones pecuniarias más ventajosas de su oferta. Los motocompresores y otros equipos fueron fabricados y provistos por el contratista bajo licencia holandesa. Mitsubishi subcontrató con la empresa local Techint la construcción civil y el montaje de las instalaciones. La empresa propietaria del proyecto disfrutó desde un comienzo una posición dominante en el mercado local. Se trata del primer y único complejo de fertilizantes nitrogenados del país.

### 4. Financiamiento

El capital propio, integrado por fuentes privadas locales y extranjeras (norteamericanas) constituyó la mitad del capital total inicial. Este se complementó en base a un préstamo de largo plazo del Banco Interamericano de Desarrollo. La inversión original fue algo superior a los 20 M dólares. De las inversiones "battery limits", las unidades de amoníaco y urea representaron el 74 por ciento (48 y 26 por ciento, respectivamente). Aproximadamente un 52 por ciento de la inversión en equipos fue realizada localmente.

### 5. Condiciones iniciales de diseño

Es de señalar que la concepción del proyecto se realizó a través de la misma firma que suministró la ingeniería básica (CHEMICO). Escasa fue, por tanto, la participación de profesionales locales en la definición de las condiciones iniciales de diseño. En el estudio inicial de factibilidad se estableció el equilibrio de capacidades entre las diversas secciones (plantas), definido por un amplio intercambio de productos en proceso o terminados entre las mismas. Si bien se aplicaron ciertos criterios sobre tamaño mínimo de planta (en función de una operación rentable a niveles internacionales de precio), el dimensionamiento definitivo de las plantas quedó rezagado respecto de la frontera internacional por el dinamismo con que ésta se movió durante los cinco años que transcurrieron entre la época de concepción del proyecto y su puesta en marcha. En efecto, durante ese período (1963/68) se verificaron importantes mejoras en lo relativo al proceso de reformación, a las operaciones unitarias, aumentos de escala e integración del diseño ingenieril. Estos avances empezaron a hacer su aparición a escala comercial a mediados del decenio de los '60.

En esa época comenzó a generalizarse, asimismo, el empleo de compresores centrífugos (aptos para capacidades desde las 550t/d de amoníaco), que requieren menor mantenimiento que los recíprocos, son más confiables, más fáciles de operar y son propulsados por turbinas de vapor en lugar de motores. Mientras que, en la época de concepción del proyecto las escalas internacionales típicas de producción de amoníaco se situaban en el rango de las 300/400 t/d (con lo cual la planta en cuestión resultaría de una dimensión mediana en relación a la internacional), en la época de la puesta en marcha ya se había alcanzado el rango de las 1000-1500 t/d (por lo que, en definitiva, el tamaño resultó pequeño dada la rápida sustitución de escalas menores por mayores en el mercado internacional).

Las condiciones iniciales de diseño más relevantes incluyen:

- capacidad y rendimiento del proceso
- empleo de compresores recíprocos y especificación de otros equipos principales
- calidad de catalizadores
- equilibrios térmicos y másicos
- interdependencia operativa

Los principales factores de sobre y subdiseño resultaron:

(i) En la planta de urea:

- escasa previsión de equipos auxiliares y stocks requeridos de repuestos (sD)
- bajo factor de servicio de los equipos (compresores y reactor) (sD)
- deficiente suministro de anhídrido carbónico y de amoníaco (sD)

Si bien existió la posibilidad de aumentar la capacidad de compresión y de bombeo de anhídrido carbónico, ello requería inversiones significativas en activo fijo y por tanto, no puede considerarse como un factor de sobrediseño (ver definiciones en el capítulo II).

(ii) En la planta de amoníaco:

- bajo factor de servicio de compresores, reformador y de absorción de anhídrido carbónico (sD)
- baja velocidad normal de motores (sD)
- escasa previsión de equipos auxiliares y de stocks necesarios de repuestos (sD)

En este caso, la posibilidad de aumentar la capacidad de compresión también requería inversiones significativas en activo fijo y tan solo permitían alcanzar la capacidad de diseño. Por tanto, este factor no puede considerarse como de sobrediseño.

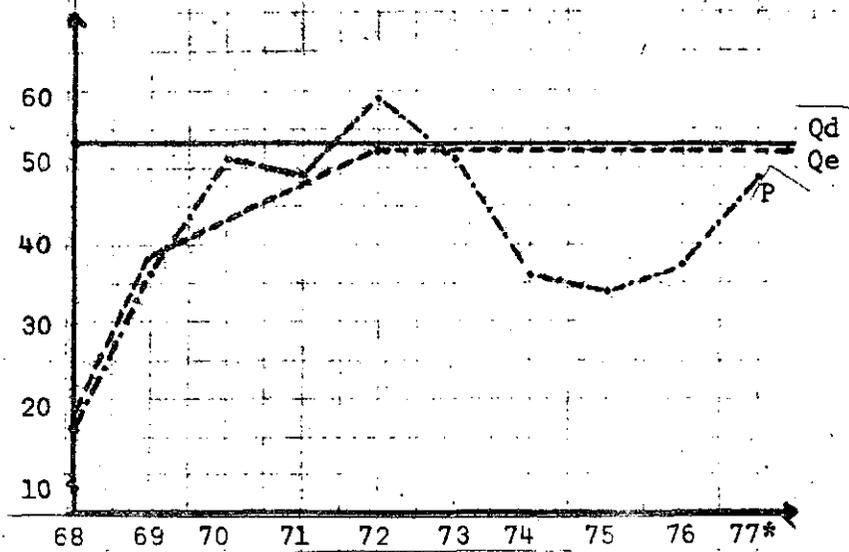
También puede calificarse como factor de subdiseño la subestimación de las necesidades de aprendizaje de los cuadros técnicos de planta respecto de las particulares condiciones operativas a altas presiones y temperaturas del proceso. Dada la escasa experiencia previa, esto condujo a dificultades para confrontar problemas de corrosión.

## 6. Performance técnica y esfuerzos de ingeniería de planta

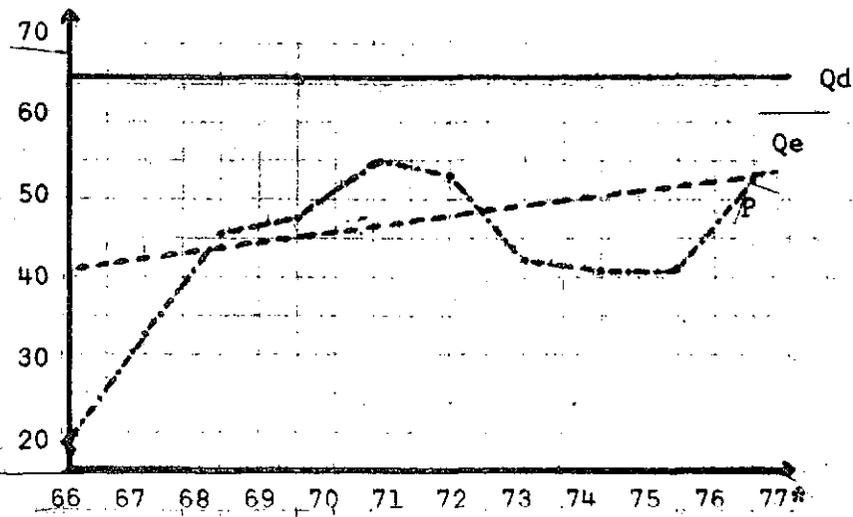
Los gráficos de la página siguiente revelan el comportamiento de las curvas de producción y (estimación) de la capacidad efectiva de las plantas de urea y de amoníaco, respecto de la capacidad de diseño. (Los valores están expresados en miles de t/a)

Se observa que la capacidad efectiva de la planta de urea durante los primeros dos años posteriores a la puesta en marcha (abril de 1968), se mantuvo significativamente por debajo de la capacidad nominal de diseño. Aparte de los problemas iniciales de aprendizaje, hubo un problema de diseño, manifestado desde la misma puesta en marcha, provocado por un insuficiente suministro de CO<sub>2</sub> (por

Gráfico 1



UREA



AMONÍACO

- Capacidad de diseño (Qd)
- · · · · Producción (P)
- - - - - Capacidad efectiva (Qe)
- \* Estimado

parte de la planta de amoníaco). Este problema se resolvió recién al tercer año de operación (con asistencia técnica externa), pero entonces se puso de manifiesto la deficiente previsión de equipos auxiliares (particularmente bombas). En el diseño original se consideró la necesidad de paradas por sólo un mes al año para mantenimiento, reparaciones e imprevistos. De hecho, los períodos de parada triplicaron en promedio anual lo previsto. Esto (que de ninguna manera afectó al contratista por cuanto su garantía se refirió al rendimiento diario, no anual, de la planta) se originó en el bajo factor de servicio de los equipos. En 1972 se instalaron, mediante inversiones significativas en equipo fijo, un tercer motocompresor de CO<sub>2</sub>; una tercera bomba de amoníaco y una tercera bomba de carbamato. En los tres casos duplicando las capacidades unitarias respectivas previstas en el diseño (esta vez los equipos fueron de procedencia norteamericana). Merced a ello fue posible alcanzar (y aun, pasajeramente, superar) la capacidad nominal de diseño, confrontándose entonces la limitación dada por la capacidad de los demás equipos de diseño (reactor, cristalizador, absorbedores y descomponedores). De no haberse realizado esas inversiones e introducido mejoras incrementales que se mencionan mas abajo, la capacidad efectiva estaría aun sustancialmente por debajo de la capacidad de diseño.

Las mejoras localizadas realizadas por el personal técnico de la empresa que coadyuvaron a reducir el margen de subdiseño inicial incluyeron:

(i) ajuste de las condiciones de funcionamiento de los motores para obtener la máxima potencia de funcionamiento de los compresores de anhídrido carbónico. Esto permitió aumentar la cantidad de CO<sub>2</sub> que alimenta el reactor de urea, mediante el aumento de la presión de succión.

(ii) instalación de una bomba de CO<sub>2</sub> líquido. Siendo la capacidad de compresión el cuello de botella para aumentar el volumen de producción, se instaló esa bomba en paralelo con los dos compresores existentes para alimentar el reactor de urea.

(iii) se modificó el circuito de enfriamiento de los cristalizadores mejorando el intercambio calórico y aumentándose la capacidad de cristalización.

(iv) modificaciones en las bombas de carbamato lo cual permitió aumentar su factor de servicio

(v) aumento de la extracción de calor de la planta mediante utilización del agua tratada antes de ser incorporada al sistema de agua de alimentación de calderas.

Asimismo, sobre la base de asistencia técnica externa (Ivo Mavrovic y TECHNIP), se introdujeron las siguientes modificaciones:

(i) Inyección de aire de alta presión en la corriente de amoníaco líquido que alimenta al reactor, y

(ii) medición continua de la concentración de carbamato (compuesto intermedio en la producción de urea) que recircula hacia el reactor.

Con la primera innovación se logra un aumento de la conversión del reactor

y, consiguientemente, un incremento del 2/3 por ciento en la producción de urea y una reducción del consumo de vapor de 150kg/ton. de urea producida. La segunda modificación se lleva a cabo incorporando un analizador de concentración de carbamato que permite el chequeo y optimización de la misma de modo de obtener una mejor conversión en el reactor y menor consumo de vapor y agua de enfriamiento.

Ambas modificaciones (que están protegidas por patentes) implican la incorporación de un compresor de aire de alta presión y un analizador de carbamato a la planta actual. Incluyendo esta inversión y el costo de la asistencia técnica la cifra involucrada supera los 300.000 dls.

Otras mejoras menores introducidas por el plantel técnico de la planta, que condujeron a menores costos de mantenimiento y aumentos en la capacidad efectiva incluyen:

- (i) cambio de la zaranda existente en la torre de prilling
- (ii) bocas nuevas de inspección en diferentes equipos
- (iii) colocación de tapas a los cristalizadores
- (iv) nuevo diseño del manifold de succión en las bombas de carbamato
- (v) cambio de agujeros en la torre de prilling
- (vi) instalación de diversas líneas de lavado
- (vii) diversas modificaciones en el sistema de control del proceso e instalación de nuevos instrumentos
- (viii) modificaciones en el absorbedor (cambio de relleno, colocación de spray internos, colocación de reciclo de carbamato al fondo de la torre)
- (ix) instalación en una nueva disposición de los ventiladores de prilling.

Asimismo, se realizaron algunas modificaciones que permitieron un mejor manejo de materiales e índice de recuperación:

- (i) instalación de un sistema de recuperación de condensado
- (ii) mejora y aumento de la recuperación de agua de enfriamiento mediante instalación de nuevas bombas y cañerías;
- (iii) construcción e instalación de ciclones, y
- (iv) cambio en el diseño de la parte inferior de la torre de prilling.

Como puede apreciarse en el gráfico concerniente a amoníaco, en el caso de este producto el margen de subdiseño fue aun más significativo que en el de la urea. Si bien, por diseño, una proporción importante del amoníaco debía ser insumida para la producción de urea, el subdiseño de la planta de amoníaco no afectó sostenidamente la producción de urea por cuanto se extrajo amoníaco de

otros destinos previamente contemplados (venta a terceros). Es decir que, en términos de las necesidades de amoníaco por parte de la planta de urea, la planta de amoníaco estaba felizmente sobredimensionada.

La naturaleza de los factores de subdiseño que resultaron dominantes fue muy similar a la del caso de la urea. También aquí se sobrestimó el factor de servicio, en especial, de los compresores, pero también del reformador y de la absorción de  $\text{CO}_2$ . El tiempo promedio anual de parada superó en este caso en 3.4 veces el dictado por las condiciones de diseño. Esto obedeció fundamentalmente a que, de acuerdo con esas condiciones, para poder alcanzar las 66.000 t/a, hubiese sido necesario parar los compresores sólo un mes al año y pararlos a todos simultáneamente. Técnicamente ello no fue posible. De hecho, fue necesario pararlos en distintos momentos. Y, frente a ello, no se contaba con el equipo auxiliar necesario como para reemplazar al compresor que se paraba. Siempre el cuello de botella fundamental se refirió a la capacidad de compresión. Los esfuerzos de ingeniería de planta estuvieron consagrados particularmente a aumentar el factor de servicio de los compresores. Esto incluyó la investigación e introducción de mejoras concernientes a:

- (i) múltiple y las cañerías de escape;
- (ii) sistema de encendido;
- (iii) filtros de aire de combustión y de procesos;
- (iv) lubricación en las etapas de aire (compresión);
- (v) separación de aceite en las etapas de aire (compresión), y
- (vi) lubricación de las guías de las válvulas.

Con ello se llegó a hacerlos operar a la capacidad diaria, pero no anual de diseño. Nuevamente, las garantías del contratista, como en el caso de la urea, se refirieron al rendimiento diario de la planta, no el anual.

Similar dificultad con el reformador se confrontó por medio de un cambio en el flujo de precalentado gas-vapor de esa sección. También para la capacidad dada de compresión, se procuró aumentar el rendimiento (reducir consumos unitarios) mediante cambios de catalizador. Sólo merced a la próxima instalación de un cuarto compresor, mediante inversión significativa en activo fijo, se llegará a alcanzar la capacidad de diseño, en lugar de las 4.800-5.000 ton/mes a las cuales como máximo se pudo llegar (83 por ciento de la capacidad de diseño). Ello permitirá también anticiparse a futuros cuellos de botella, los cuales pasarán a referirse al proceso mismo.

El hecho de que, particularmente en 1972, según muestra el gráfico, el nivel de producción superó la capacidad efectiva obedece a que se forzó las velocidades de los motores por encima de la que estos admitían en condiciones normales de operación, originándose, por tanto, dificultades de mantenimiento. Otro esfuerzo adicional consistió en la reubicación de un separador de amoníaco líquido, con lo que fue posible mejorar el arrastre. Se considera que los esfuerzos en lo relativo a reducción de consumos unitarios han alcanzado ya un plateau.

Las iniciativas respecto de modificaciones localizadas por parte del plantel técnico de la planta no estuvieron exclusiva, aunque sí mayormente, referidas a las plantas de urea y de amoníaco. También se realizaron algunas mejoras en las plantas de ácido sulfúrico y de sulfato de amonio así como en lo que respecta a los servicios auxiliares. Ellas fueron:

(i) planta de ácido sulfúrico:

- colocación del soplador de aire antes de la torre de secado. Por diseño, la ubicación era después de dicha torre. Con ello se pudo aumentar el caudal de aire y así, la capacidad efectiva.
- se disminuyó la temperatura de entrada del aire al horno de combustión de azufre. Esto se efectuó eliminando el paso del aire a través del convertidor de  $SO_3$ .
- se aumentó la capacidad de las fosas de fusión de azufre
- se instaló una segunda bomba de circulación de ácido 98 por ciento.
- se aumentó el volumen del catalizador.
- se construyó e instaló un economizador de distinto diseño

Con estas modificaciones menores de las condiciones iniciales de diseño, sin inversiones significativas en activo fijo, se logró un aumento de aproximadamente un 30 por ciento en la capacidad efectiva de la planta de ácido sulfúrico por encima de la capacidad de diseño.

En lo que respecta a la planta de sulfato de amonio, se modificaron las condiciones de trabajo del reactor de sulfato de amonio.

Finalmente se introdujeron mejoras en efluentes (instalación de un sistema de separación de aceites, de un tomamuestra continuo en los efluentes líquidos, de un dique en el canal de desagüe para aumentar el tiempo de retención y de sensores alrededor de cada planta para determinar la calidad del aire) y en servicios generales (mejora de la calidad del agua, diseño de una instalación para alimentar con fuel-oil las calderas, instalación de filtros en el sistema de agua de enfriamiento, modificaciones en el sistema de agregado de ácido a la torre de enfriamiento e instalación de una estación medidora de caudal de gas).

## APENDICE C

### Ingeniería de Mejora en una Planta de Etileno \*

En este apéndice y en el siguiente se examinarán a título ilustrativo dos ejemplos del tipo de sendero mejorativo recorrido a partir de esfuerzos de ingeniería de planta.

La planta de etileno, cuyo caso será examinado en este apéndice, es la de PASA Petroquímica Argentina S.A. en San Lorenzo, Pvcia. de Santa Fe (ver flow-sheet adjunto). Está incluida en un complejo que comprende además de etileno, la producción de aromáticos, estireno, butadieno, SBR y otros productos.

El diseño original de la planta contemplaba como materia prima exclusiva el propano, así como el reciclaje a los hornos de craqueo, del etano proveniente del fondo de la columna de separación etileno-etano. En adición a ello, se alimentaba en la sección de compresores una corriente residual de una planta vecina de butadieno (denominada corriente de cima de la torre reabsorbidora), que luego era procesada en la sección de destilación, recuperándose el etileno que esa corriente contenía. La subsiguiente sobrecarga de la sección destilación había sido contemplada mediante un adecuado sobredimensionado.

Además del etileno, por la cima de la torre despropanizadora se obtenía otra corriente compuesta por una mezcla de propano y propileno cuyo valor sólo era un tanto combustible.

El aludido sobredimensionado relativo de la sección destilación fue progresivamente anulándose mediante sucesivas expansiones de la capacidad de craqueo. Al mismo tiempo, limitaciones en el suministro de propano comenzaron a hacer insuficiente la materia prima para alimentar los hornos de craqueo.

Ante esta situación se adoptó la siguiente estrategia mejorativa que incluyó modificaciones en las condiciones iniciales de diseño. Tales modificaciones y mejoras fueron concebidas y realizadas por el plantel de ingeniería de planta de la firma.

En primer lugar, se modificó el destino de la corriente de cima de la torre despropanizadora (propano y propileno aproximadamente al 50 por ciento cada uno), comenzando a alimentarla directamente en los hornos de craqueo junto al propano "fresco".

Esta idea había recibido algunas críticas referidas al menor rendimiento de etileno que cabría esperar del craqueo del propileno comparativamente al propano, y al mayor tiempo de parada previsible en la sección de compresores por mayor ensuciamiento (debido a polimerización de los subproductos pesados y a las diolefinas en las válvulas). Empero, los ensayos realizados así como la experiencia posterior permitieron mostrar que la producción específica de etileno es la misma respecto al propano que a la mezcla propano-propileno, aun cuando

---

\* Ver, "Mejoras de Proceso en Una Planta de Etileno", R.M. Dietrich, PASA, Argentina (sin fecha).

el porcentual de éste último se encuentra en el orden del 25-30 por ciento. En cambio, la producción relativa de subproductos livianos en relación a los pesados se reduce en el caso del craqueo de la mezcla. Esto implica una ventaja económica adicional, debido al mayor valor de los subproductos pesados. Se verificó también un mayor ensuciamiento de los compresores, aunque la magnitud del mismo fue despreciable.

Mercèd a esta modificación, el consumo específico de propano fresco en términos de etileno producido se redujo de 2,9-3,0 TM/TM a 2,0-2,1 TM/TM; en tanto que el consumo de propano más propileno en términos del etileno producido se mantuvo en 2,9-3,0 TM/TM, esto es, verificándose un rendimiento equivalente.

Así se obtuvo, en síntesis, un mejor aprovechamiento de la materia prima y una más conveniente distribución económica del out-put mix.

Debido a la ya mencionada desaparición del sobredimensionado inicial de la sección destilación respecto de la de craqueo, así como a la insuficiente provisión de propano fresco, se procedió seguidamente a modificar la forma de procesar la corriente gaseosa de la cima de la torre reabsorbedora de butadieno.

Nunca antes se había pensado en craquear esa corriente en forma directa debido a su contenido de propileno, al peligro de destrucción del etileno que contiene (alrededor del 10 por ciento) y a la pérdida de capacidad de los hornos de craqueo debido a la presencia de hidrógeno e inertes.

La primera razón quedó desvirtuada a raíz de la experiencia ya reseñada con el craqueo de la corriente de la cima de la torre despropanizadora: el propileno no perjudicaba la distribución de productos resultante de la reacción.

Con objeto de testear las otras dos objeciones, se modificó la ubicación del punto de alimentación de esta corriente, trasladándola de la sección de compresores a los hornos de craqueo, previo pasaje por las torres de tratamiento para eliminación de CO<sub>2</sub> con monoetanolamina. Tal como ocurrió en el caso del craqueo de la corriente de propano-propileno, la experiencia indicó que el etileno alimentado al horno no era destruido, ya que el consumo específico de propano y propileno se mantuvo constante. Asimismo, tampoco se observó disminución alguna de la capacidad de carga de los hornos por la presencia de material inerte.

De tal modo, se obtuvo el aprovechamiento de la materia prima contenida en la corriente gaseosa de cima de la torre reabsorbedora de butadieno de manera directa, y además, un incremento automático de la capacidad de las secciones de compresores y destilación. Se logró, asimismo, ahorros en el consumo de vapor, agua, refrigeración y demás servicios requeridos para procesar la corriente de cima reabsorbedora de butadieno en las dos áreas consignadas.

Prosiguiendo la misma línea de búsqueda, se comenzaron a utilizar como materia prima corrientes residuales de otras áreas del complejo.

Así, hay un subproducto de la fabricación de etileno constituido por una corriente líquida muy rica en aromáticos (que se obtiene en la sección de compresores). Se trata de compuestos pesados resultantes de las reacciones de craqueo que condensan la corriente de gases efluentes de los hornos por compen-

sación y enfriamiento. Debido a que se trata de cantidades relativamente pequeñas (alrededor del 6-7 por ciento del etileno producido), esta corriente no era recuperada y se descargaba en el sistema general de efluentes del complejo.

Al aumentar la capacidad de la planta merced a las expansiones ya obtenidas, la cantidad del subproducto líquido ("diprolene"), también creció proporcionalmente. Además del valor potencial desperdiciado con esta corriente, se crearon serias dificultades en el sistema de tratamiento de efluentes para la eliminación de la contaminación originada por el producto.

Por lo tanto, se pensó en aprovechar el diprolene para su ulterior tratamiento destinado a recuperar los aromáticos que contiene. Esto implica un proceso de hidrogenación catalítica que elimina las olefinas y diolefinas presentes en la corriente. Estas últimas producen ensuciamientos severos por polimerización en los posteriores procesos de separación de aromáticos.

Tal fue el procedimiento adoptado, lográndose un importante beneficio económico de una corriente originalmente desperdiciada y, al mismo tiempo, la eliminación de una importante fuente de contaminación ambiental.

Ya se observó que la corriente recibida desde la cima de la torre reabsorbadora de butadieno (cuyo punto de alimentación a la planta fue modificado) era tratada, por diseño, en una unidad de absorción con monoetanolamina para la eliminación del anhídrido carbónico contenido en la misma. En el diseño original, esta unidad fue prevista para tratar la corriente total de salida de los hornos de craqueo, la cual pasaba luego por otra unidad de absorción, con soda cáustica.

Debido a la presencia de compuestos pesados olefínicos y diolefínicos altamente reactivos en el efluente de los hornos, durante la absorción del  $\text{CO}_2$  se producían reacciones entre la monoetanolamina y los compuestos pesados. Esto originaba un gran consumo de monoetanolamina y el severo ensuciamiento de la torre de absorción y demás equipos por la naturaleza plástica del compuesto formado. En consecuencia, debían sufragarse elevados gastos de mantenimiento y pérdidas de producción por limpieza de la unidad.

Habiéndose encontrado que la mayor parte del  $\text{CO}_2$  presente en la corriente efluente de los hornos se encontraba ya en la carga a los mismos aportada por la corriente de cima de la torre reabsorbadora de butadieno, se decidió modificar el diseño.

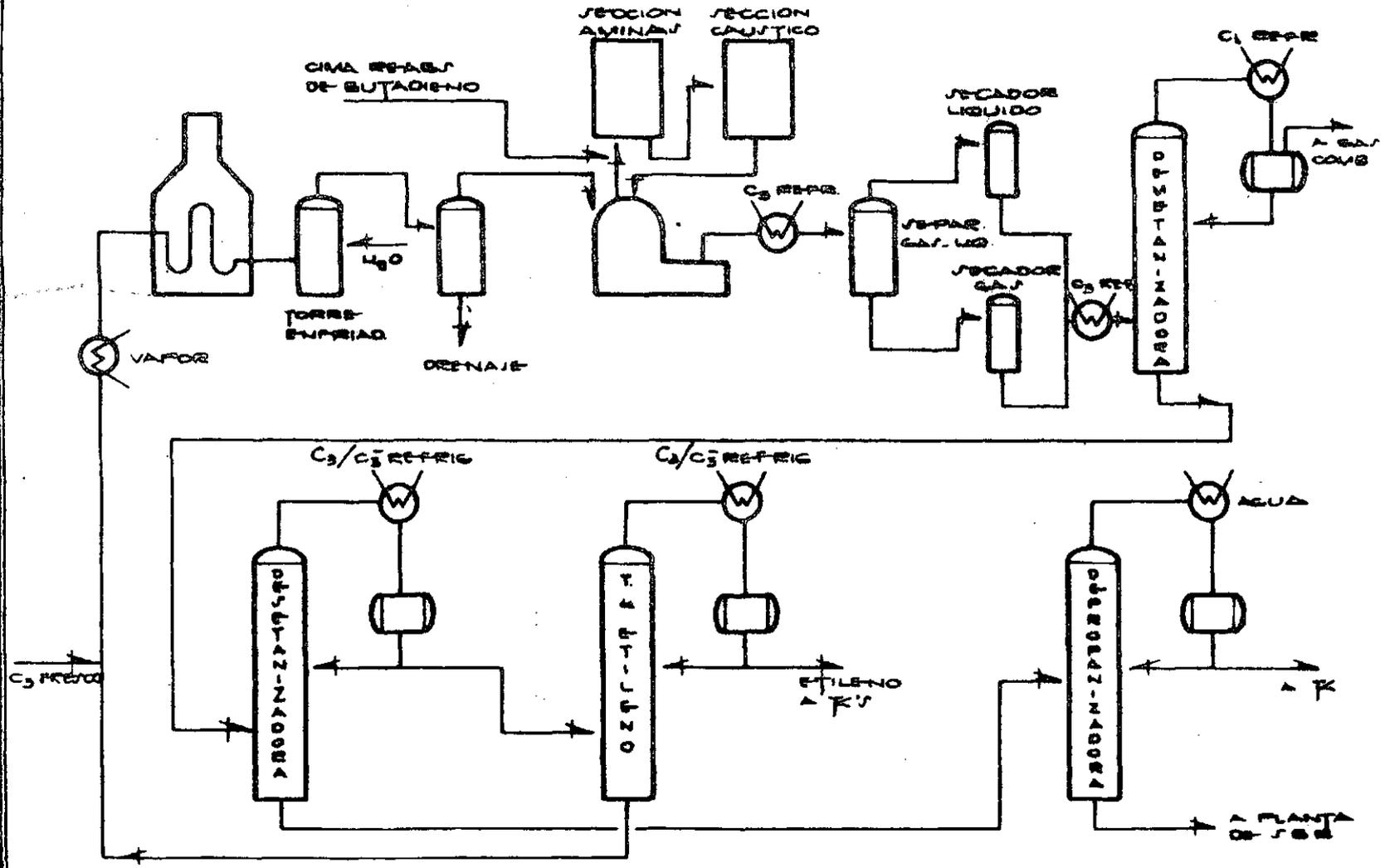
Se continuó el tratamiento del efluente de hornos sólo en la unidad de absorción con soda cáustica. Se reservó el tratamiento con monoetanolamina para la corriente de cima de la torre reabsorbadora.

Al eliminar el  $\text{CO}_2$  de la carga, el contenido del efluente del horno disminuyó a valores muy bajos, perfectamente eliminables por tratamiento con cáustico. Por otra parte, al no contener la cima de la torre reabsorbadora compuestos pesados polimerizables, desapareció el ensuciamiento y se redujo el consumo de monoetanolamina a un valor mínimo.

Esta modificación facilitó, asimismo, la anteriormente consignada reubi-

FLOW-SHEET ORIGINAL SIMPLIFICADO

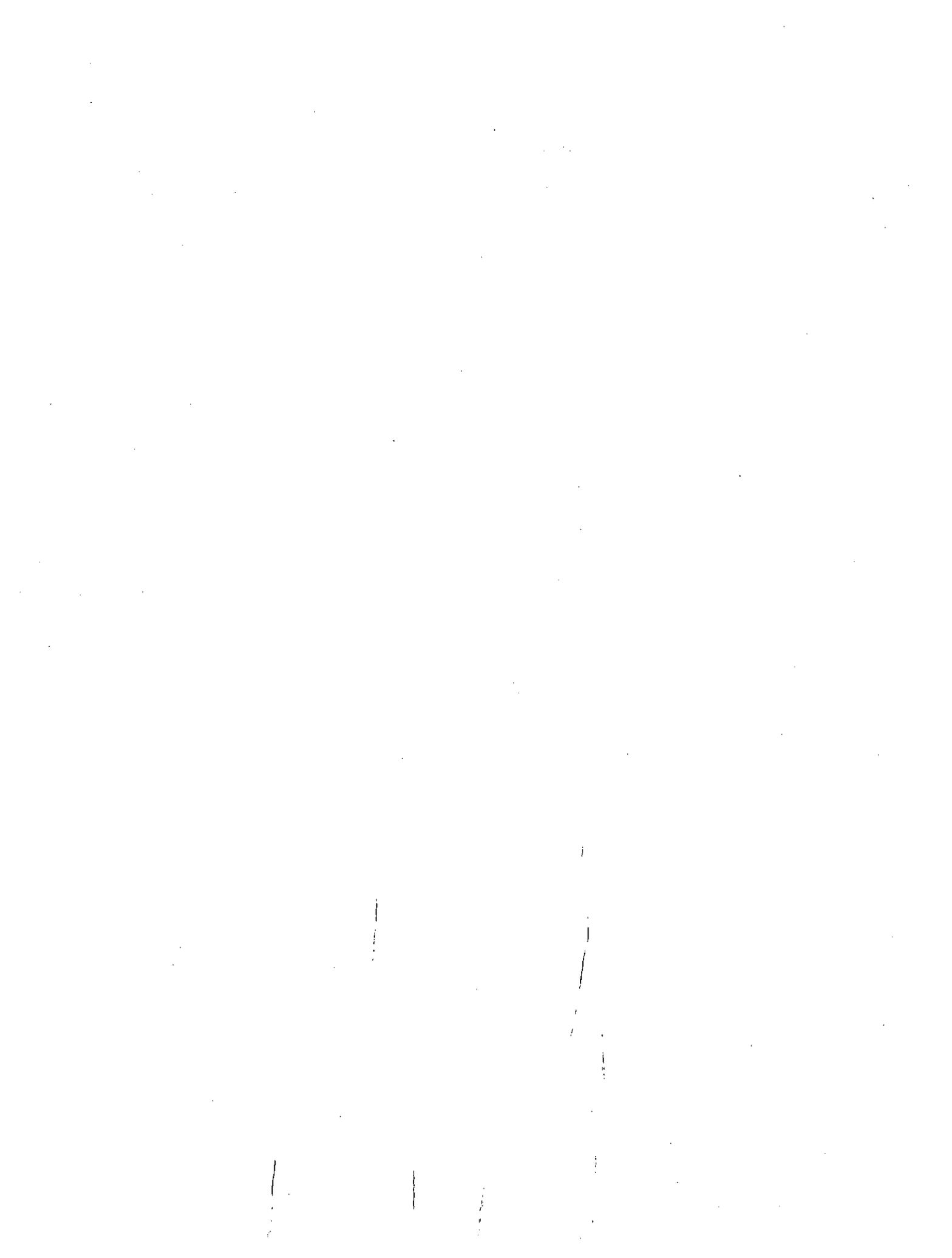
PLANTA ETILENO



cación de la alimentación de la cima de la torre reabsorbedora, al independizarla del efluente general de los hornos.

Los costos de mantenimiento y el consumo de productos químicos se vieron así reducidos, además de lograrse un aumento de la capacidad de producción de etileno por reducción del tiempo perdido en paradas para limpieza de la unidad de absorción.

En términos de capacidad, el saldo acumulado de todos estos esfuerzos se expresa en una superación de la capacidad de diseño en un 55 por ciento.



## APENDICE D

### Innovación en ingeniería de productos \*

Se trata de una planta de poliestireno cuyo elenco de ingeniería introdujo innovaciones menores apreciables en el área de productos, sustitución de materias primas importadas y diseño de equipos e instalaciones. Nos centraremos aquí en dos ejemplos de innovación en ingeniería de productos.

#### Copolímeros Graft

La introducción de la reacción Graft tiene por objeto el logro de un poliestireno resistente al impacto. En el mercado argentino, ha dado lugar a un acelerado crecimiento de la línea de producción de envases desechables.

Se parte de una solución de caucho en estireno que, durante la polimerización, atraviesa por una etapa de inversión de fase. Esta implica grandes cambios físicos y de aspecto en términos de viscosidad, brillo, etc. Este fenómeno ocurre cuando la conversión alcanza un contenido de sólidos entre el 20 y el 40 por ciento. Allí el estireno, cuyo comportamiento es similar al de un solvente, se va consumiendo para originar poliestireno. Por tanto, la viscosidad del medio aumenta debido a que su concentración en caucho es aumentada. Esto continúa hasta que la cantidad de poliestireno originada en forma paralela es suficiente como para ocupar el lugar del monómero agotado. Se pasa así a un nuevo medio con una faz continua -el poliestireno-, en el cual se halla disuelto el caucho.

Este caucho, cuya presencia es fundamental en el poliestireno de impacto, se halla disuelto en forma de pequeñas partículas de caucho que se injertan en las cadenas de poliestireno. El tamaño de las partículas es de fundamental importancia, ya que si es grande o muy pequeño, prácticamente no generan ninguna resistencia al impacto, presentando en el primer caso lo que habitualmente se conoce como puntos duros.

El logro de un tamaño de partícula adecuado para estas reacciones ha sido una de las metas propuestas por el plantel de ingeniería de la empresa. Para ello se recurrió al estudio microfotográfico de las cargas. Este seguimiento dió lugar a un ajuste del tiempo de reacción y de los catalizadores, obteniéndose de esta manera el tamaño deseado de las partículas. Asimismo, se obtuvo una reducción del número residual en el polímero final. La presencia de ese número residual origina, entre otras consecuencias indeseables, una disminución en la temperatura de deformación.

A partir de las modificaciones operativas, así como de las variantes en los catalizadores introducidos por el plantel de ingeniería, el valor final de la especificación del número se ubicó en la mitad del valor aprobado para uso en envases desechables -a través de normas oficiales que establecen un tenor máximo- en los Estados Unidos.

\* Ver: Oettinger, C.A. o Iglesias Rodríguez, H., "Creación de Tecnología en el Área del Poliestireno". 3er. Congreso Nacional de Petroquímica, Salta 1974.

La reacción Graft desarrollada es completamente distinta de la utilizada por diseño original, con propiedades físicas y de aspecto muy mejoradas. El siguiente cuadro pone de manifiesto este patrón de mejoras:

	Propiedades de Diseño	Propiedades Mejoradas
Resistencia a la Fracción (Kg/cm <sup>2</sup> )	215	212
Elongación (%)	25	35
Melt Index-Condición "L" (gr/10Min.)	4	5
Temp. Deform. bajo Carga (°C)	73	77
Impacto Izod (Dg/cm)	9	12
Impacto Gardner (Kg./cm)	5,3	11,8
Impacto G. Electric (Kg/cm)	8,2	33,4
Flexibilidad Manual	31	48

#### Poliestireno Expandido

Esta reacción se opera en suspensión, aunque bajo condiciones sumamente inestables. Por ello, sus requerimientos de control son muy estrictos.

El propósito del proceso consiste en lograr un tamaño de cuentas uniforme. Las cuentas luego son impregnadas mediante un hidrocarburo liviano que es el que finalmente le confiere la propiedad de expansión que lo caracteriza.

El desarrollo del producto por el plantel se confrontó con riesgos de carácter económico dado el hábito del mercado local por operar con máquinas que se adaptaban a los materiales importados de Alemania, uno de los principales productores mundiales.

La tecnología y el diseño originales, provistos por Koppers, se refería a materiales que se desempeñaban muy bien en E.E.U.U., donde las máquinas transformadoras se diseñaron exclusivamente para esa firma. No ocurrió lo mismo, sin embargo, en Argentina, donde surgieron grandes problemas de adaptación a las máquinas ya destinadas para otros materiales.

Se inició así un trabajo de equipo entre los departamentos de comercialización, producción e ingeniería de la empresa, con objeto de adaptar el poliestireno expandido al mercado local.

Se confrontaron dos problemas principales. En primer lugar, con el tamizado. En segundo término, el referido a la necesidad de propiedades antiestáticas.

El control del tamaño adecuado de partículas es uno de los objetivos de la etapa de polimerización. Es sumamente difícil evitar que, junto con las cuentas en especificación, se hallen otras que están por arriba o por debajo de dicho valor. Esto genera lo que se conoce como corte grueso y corte fino o polvo. Debido a ello se requiere una posterior etapa de tamizado con objeto de normalizar los tamaños. De lo contrario se originan grandes problemas a los transformadores. Tal el caso de las cuentas gruesas, que obturan las "pistolas automáticas" de carga de las bloqueras.

Dado que el mercado transformador se hacía cada vez más exigente en términos de calidad, fue necesario reevaluar todo el proceso de tamizado.

Luego de un número de estudios y ensayos, se optó por el rediseño de equipos tamizadores que se hallaban fuera de uso por ineficientes. Se los dotó de nuevos tamices, y se les diseñó un sistema de autolimpieza a cepillos. Asimismo, se les adicionó, mediante el agregado de elementos de golpeteo al único movimiento vibratorio de transporte en el plano horizontal, otro movimiento en el plano vertical.

Más o menos rápidamente se pudo comprobar la eficacia de estos nuevos equipos totalmente reconstruidos en planta. Estos llegaron a procesar 700-800 Kgs/m<sup>2</sup>/hora, cifra que duplica lo típico para estos equipos.

Otro paso importante consistió en la obtención de propiedades antiestáticas. Estas propiedades, inexistentes en el mercado de EE.UU., eran necesarias en el mercado local con objeto de competir con material importado de origen europeo.

La carga estática afecta doblemente la calidad del material. Por un lado dificulta el procesamiento, ya que el material expandido se transporta neumáticamente, cargándose severamente en su recorrido. Esto provoca racimos de cuentas, que impiden un llenado adecuado de los moldes, generando un elevado porcentaje de rechazo. Por el otro, la carga estática atrae el polvo ambiente, deteriorando el aspecto del producto, que con frecuencia es usado en exhibidores de mercadería o en envases de productos de alto costo. En la actualidad, el poliestireno expandido local cumple especificaciones tan estrictas como las de los más importantes oferentes mundiales.



## BIBLIOGRAFIA

### A

Alchian, A., Reliability of Progress Curves in Airframe Production, The RAND Corporation, R. M.-260-1, February, 1950.

Alchian, A., "Costs and Outputs", en Abramovitz, M. et al., The Allocation of Economic Resources, Standford Univ. Press, 1959.

Almeida, F., Guimaraes, e. y Fighereido, M.M., Potencial de Pesquisa Tecnologica no Brazil, IPEA, Brasilia, 1971.

Andress, F.J., "The Learning Curve As a Production Tool", Harvard Business Review, January-February 1954.

Arrow, K. J., "The Economic Implications of Learning by Doing", Review of Economic Studies, June 1962.

Ashley, J.A., "Importance of Design Concept in Reducing Plant Costs", Chemical Engineering Progress, May 1962.

Atkinson, A.B. y Stiglitz, J.E., "A New View on Technological Change", Economic Journal, Vol. LXXIX, 1969.

### B

Baloff, N., Manufacturing Startup: A Model, Ph. D. Thesis, Standford University Press, 1963.

Baloff, N., "Startup in Machine-Intensive Productions Systems", Journal of Industrial Engineering, 1967.

Bauman, N.C., Fundamentals of Cost Engineering in the Chemical Industry, Reinhold, New York, 1964.

Binswagner, N.P., "A Microeconomic Approach to Induced Innovation", The Economic Journal, December, 1974.

Boot, G.K., Economic Choice of Numan and Physical Factors in Production, North Holland, Amsterdam, 1964.

### C

Campbell, C.A., Derivation of Production Functions and Cost Curves for Electrolytic Chlorine Manufacture, B.Sc. Thesis, M.I.T., Cambridge, Mass. 1959.

Clark, M.E., De Forest, E.M. y Steckley, L.R., "Aches and Pains of Plant Startup", Chemical Engineering Progress, December 1971.

Cookerboo, L., "Costs of Operating Crude Oil Pipelines", The Rice Institute Pamphlet, Vol. XLI, Nº1, April 1954.

Chemical Engineering Progress, "Effort to Cut Costs Leads to Process Upgrading", February 14, 1977.

Chenery, M.B., "Engineering Production Functions", Quarterly Journal of Economics, November 1949.

Chenery, M.B., "Overcapacity and the Acceleration Principle", Econometrica January 1952.

Chenery, M.B., "Process and Production Functions from Engineering Data"; Chapter 8 in Studies in the Structure of the American Economy, ed. Leontief, V., Oxford 1953.

Chilton, C.N., "Six-Tenths Factor's Applies to Complete Plants Costs". Chemical Engineering, April 1950.

Chipman, J.S., "Induced Technical Change and Patterns of International Trade", in Vernon R. (ed.), The Technology Factor in International Trade, Cambridge 1970.

D

David, P., "Learning by Doing and Tariff Protection: A Reconsideration of the Case of the Ante Bellum U.S. Cotton Textile Industry", Journal of Economic History, 30, September, 1970.

David, P., Technical Choice, Innovation and Economic Growth, Cambridge University Press, 1975

Ducommun, J.C., Process Safety, Informe Presentado Durante la XXXVI Reunión Anual del American Petroleum Institute, Vol. I, American Oil Company, Chicago, 1966.

E

Eilon, S., Gold, B. y Soesan, J., Applied Productivity Analysis for Industry, Pergamon Press, London, 1976.

Eng, L.L.C., An Economic Analysis of the Fluid Catalytic Cracking Process, M.Sc. Thesis, Cambridge, M.I.T., 1960.

Enos, J.L., "A Measure of the Rate of Technological Progress in the Petroleum Refining Industry", Journal of Industrial Economics, June 1958.

## G

Gans, M. y Fitzgerald F.A., "Arranque de Plantas", en Landau, R.(ed.), La Planta Química: Desde la Selección del Proceso Hasta la Operación Comercial, Cía. Editorial Continental, S.A., México, 1970.

Giral, J., Manual para Desarrollo, Transferencia y Adaptación de Tecnología Química Apropriada, Departamento de Ingeniería Química, Grupo de Desarrollo de Tecnología, Facultad de Química, División de Estudios Superiores, México, 1974.

## H

Henderson, R., Plant Startup Productivity-Measuring and Predicting Performance in Continuons Casting Steel Machines, Ph.D.Thesis, The University of Western Ontario, 1975.

Hicks, J., The Theory of Wages, MacMillan Co., London, 1932.

Hirsch, W.Z., "Manufacturing Progress Functions", Analysis of Industrial Operations, Bowman, W.N. y Fetter, R.B. (ed.), Homewood, Illinois, Irwin, 1959.

Hirschman, W.B., "Profit from the Learning Curve", Harvard Business Review, January-February, 1964.

Hollander, S., The Sources of Increased Efficiency, M.I.T., University Press, 1965.

## J

Johnson, H., "Optimal Trade Intervention in the Presence of Domestic Distortions" en Trade, Growth and the Balance of Payments, North Holland, 1965.

Johnson, H., "A New View of the Infant Industry Argument", en Mc Dougall, I.A.y Snape, R.H. (ed.), Studies in International Economics; The Monash Conference Papers, Amsterdam, 1970.

## K

Katz, J., Importación de Tecnología, Aprendizaje e Industrialización Dependiente, FCE, México, 1976.

Katz, J., Cambio Tecnológico, Desarrollo Económico y las Relaciones Intra y Extra Regionales de la América Latina. Programa BID/CEPAL de Investigación en Temas de Ciencia y Tecnología. Seminario Sobre Areas Prioritarias de Investigación Economía Internacional y Países en Desarrollo. Santiago, 25-27 mayo 1978.

Kennedy, C., "Induced Bias in Innovation and the Theory of Distribution", The Economic Journal, September, 1964.

Kittrel, J.R. y Watson, C.C., "Don't Overdesign Process Equipment", Chemical Engineering Progress, April 1966.

L

Lavhari, D., "Extensions of Arrow's Learning by Doing", Review of Economic Studies, April 1966.

M

Manne, A.S., "Capacity Expansion and Probabilistic Growth", Econométrica, October, 1961.

Michel, R.D., Beattie, R.D. y Goodgame, T.M., Chemical Engineering Progress, 7, 50, 1954.

N

Nelson, R. y Winter, S., "In Search of Useful Theory of Innovation", Research Policy, 6, (1977).

O

Orsi, D.A., "Optimización de Procesos sin Perturbar la Operación", 3er. Congreso Nacional de Petroquímica, Argentina, Salta, Junio 1974.

P

Pearl, D.J. y Enos, J.L., "Engineering Production Functions and Technological Progress", The Journal of Industrial Economics, September 1975.

Petrosur, "PETROSUR", Buenos Aires, 1973.

Pratten, C.F., Economies of Scale in Manufacturing Industry, University of Cambridge, Department of Applied Economics, 1971.

R

Rapping, L., "Learning by Doing and the WWII Production Functions", Review of Economics and Statistics, 47, (1965).

Rosemberg, N., Perspectives on Technology, Cambridge University Press, 1976.

Rosen, S., "Learning by Experience as Joint Production", Quarterly Journal of Economics, August, 1972.

Rudd, D.F. y Watson, C.C., Estrategia en Ingeniería de Procesos, Editorial Alhambra, S.A., Madrid, 1976.

## S

Salter, W., Productivity and Technical Change, Cambridge University Press, 1960.

Santiago, M.de y Sercovich, F.C., Adquisición de Tecnología en las Industrias de Proceso, 1er. Simposio Interamericano de Equipos y Servicios para las Industrias de Proceso, Buenos Aires, 1974.

Sercovich, F.C., El Desarrollo de la Capacidad de Ingeniería en América Latina, Programa BID-CEPAL, Buenos Aires, 1977.

Sercovich, F.C., Negociación y Explotación de Tecnología Licenciada desde el Exterior: el Caso de la Industria Químico-Petroquímica, Organización de Estados Americanos, Washington, 1975.

Sercovich, F.C., Tecnología y Control Extranjeros en la Industria Argentina, Siglo XXI, Buenos Aires, 1975.

Sheshinski, E., "Optimal Accumulation with Learning by Doing", en Shell, K.(ed.) Essays on the Theory of Optimal Economic Growth, Cambridge, Mass, 1967.

Shishko, R., An Empirical Study of Technical Change Through Product Improvement, PhD Dissertation, Yale University, New Haven, 1972.

Simpson, L.L. y Weirick, M.L., "Designing Plant Piping", Chemical Engineering, April 3, 1978.

## W

Wionczek, M, Bueno G. y Navarrete, J., La Transferencia de Tecnología a Nivel de Empresa. El Caso de México, F.C.E., México, 1975.

Wright, T.P., "Factors Affecting the Cost of Airplanes", Journal of the Aeronautical Sciences, Vol.3, Nº4, February, 1936.

## Z

Zieke, R.P., Progress Curve Analysis in the Aerospace Industry, The Boeing Company, Seattle, Washington, June 1962.

Este libro se terminó de imprimir  
el mes de Septiembre del año 1978  
en MIMEOGRAFICA  
Calle Viamonte 2358--Buenos Aires



