

Distr.
RESTRINGIDA

LC/R.1648
5 de junio de 1996

ORIGINAL: ESPAÑOL

CEPAL

Comisión Económica para América Latina y el Caribe

USO EFICIENTE DE LA ENERGIA EN LA MINERIA
CHILENA DEL COBRE */

*/ Este trabajo fue preparado para la Unidad de Recursos Naturales y Energía, División de Medio Ambiente y Desarrollo de la CEPAL por el Programa de Investigaciones en Energía (PRIEN) de la Universidad de Chile. Su elaboración estuvo a cargo del señor Pedro Maldonado, consultor de la Unidad y contó con la colaboración del señor Iván Jaques. Agradecemos igualmente los comentarios y sugerencias de los señores Josip Baumgartner y Ernesto Madriaza. Las opiniones expresadas en este informe, el cual no ha sido sometido a revisión editorial, son de la exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la Organización.

INDICE

	<u>Página</u>
RESUMEN.....	v
I. INTRODUCCION.....	1
II. MARCO CONCEPTUAL DE la POLITICA ENERGETICA PARA LA PROMOCION DEL USO EFCIENTE DE LA ENERGIA EN LA MINERIA.....	3
III. BASES PARA EL DISEÑO DE PROGRAMAS DE EFICIENCIA ENERGETICA EN LA MINERIA.....	20
IV. PROCESOS Y AREAS DONDE DEBERÁ CONCENTRARSE LA ATENCION DE LOS PROGRAMAS DE EFICIENCIA ENERGETICA EN LA MINERIA.....	24
V. POTENCIALIDADES DE MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA CON QUE SE USA LA ENERGIA EN LA MINERIA.....	30

LISTA DE CUADROS

Cuadro 2.1: Participación porcentual de América Latina y el Caribe en el comercio mundial de minerales (año 1992).....	14
Cuadro 2.2: América Latina y el Caribe: participación de la minería en el PIB (en %).....	15
Cuadro 2.3: Participación de las exportaciones mineras en las exportaciones totales (en %).....	15

LISTA DE RECUADROS

Recuadro II-1: Barreras al uso eficiente de la energía en el sector industrial y minero.....	12
Recuadro II-2: Evolución tecnológica reciente en la explotación del cobre.....	17

RESUMEN

La globalización de la economía está imponiendo desafíos mayores a la minería de la Región: mejorar su competitividad en mercados cada día más abiertos, proteger el medio ambiente e incorporar progreso técnico.

El uso eficiente de la energía constituye uno de los medios más eficaces para el logro de dichos objetivos; para ello se deberán superar los obstáculos que impiden el pleno funcionamiento del mercado.

La necesidad de optimizar la eficiencia con que la minería utiliza la energía, proviene del hecho que la energía constituye uno de los insumos principales de la minería metálica y porque ello contribuye a asegurar la sustentabilidad ambiental de la actividad.

Estudios realizados señalan que las potencialidades técnicas de mejoramiento de la eficiencia con que se usa la electricidad en la minería chilena, responsable de alrededor de un 25% del consumo nacional de electricidad, superan el 30%.

Desde el punto de vista del mejoramiento de la eficiencia energética, existen varias opciones tecnológicas:

- Cambio de proceso; por ejemplo, cambio del horno de reverbero a convertidor modificado El Teniente u horno flash.
- Optimización del proceso; por ejemplo, ajuste fino de la cantidad de oxígeno agregada en la carga de los hornos y/o aumento de la recuperación de cobre de las escorias.
- Introducción de motores, bombas y ventiladores eficientes.
- Mejora al nivel de los sistemas usuarios; minimización de pérdidas en sistemas de transporte de materiales o fluidos, dimensionamiento adecuado de motores, aplicación de sistemas ASD en equipos de flujo variable, reemplazo de camiones por correas transportadoras.

Estas opciones fueron analizadas para la explotación minera, concentración de minerales, fundición y refinación electrolítica, indicando tecnologías posibles y resultados esperables. Finalmente, se resumieron algunos estudios de casos realizados por las divisiones de CODELCO-CHILE.

I. INTRODUCCION

El presente documento tiene por objeto identificar las potencialidades de mejoramiento de la eficiencia con que se usa la energía en la minería. Esta preocupación se encuentra inserta en la necesidad de enfrentar los desafíos que impone la globalización a un sector de gran importancia en muchos de los países de la Región. Dichos desafíos guardan relación con la necesidad de mejorar la competitividad en mercados cada día más abiertos, de proteger el medio ambiente y de incorporar progreso técnico en las distintas fases de su actividad.

El uso eficiente de la energía constituye uno de los medios más eficaces para el logro de dichos objetivos; sin embargo, para ello se deberán superar un conjunto de obstáculos que impiden que el mercado cumpla plenamente su rol de adecuado asignador de recursos.

En los países donde la minería juega un rol importante, los consumos de energía destinados a esta actividad representan un porcentaje elevado del balance energético de esos países, lo que justifica evaluar en que forma este insumo es utilizado por el sector.

Ello es aún más evidente, si se considera que los análisis realizados indican que en este sector existen significativas potencialidades de mejora de la eficiencia, los que de concretarse permitirían reducir: los consumos nacionales de energía, los costos de la actividad, los impactos ambientales y la dependencia energética de los países importadores netos o aumentar la disponibilidad de carbón, petróleo o gas natural en el caso de los países exportadores.

A pesar de los indiscutidos beneficios del uso eficiente de energía y de la existencia en el mercado de tecnologías de elevada rentabilidad para los precios y condiciones de uso vigentes en la Región, ésta no ha explotado, sino en pequeña proporción, las significativas potencialidades que se desprenden de un uso más eficiente de la energía.

Un análisis de los resultados del proceso de reforma del sector, en vigor en algunos países e incipiente en otros, y de sus políticas económicas y energéticas, no permite identificar cambios significativos en la forma con que se utiliza la energía; ya sea porque aparentemente las señales que envía el mercado no constituyen un incentivo para usarla en forma más

racional o porque ni la reforma ni las políticas contienen expresamente mecanismos que promuevan la eficiencia energética a escala nacional.

Ello se debería, aparentemente, a la existencia ya mencionada de barreras institucionales, técnicas y de mercado que frenan la difusión y masificación de las tecnologías energéticamente eficientes y rentables para el usuario. La importancia de dichas barreras no ha sido debidamente valorada en la mayoría de los países de la Región, a pesar del consenso prácticamente generalizado entre los especialistas de los países desarrollados, respecto de la necesidad de complementar los mecanismos de precios con incentivos, normativas y otras modalidades de intervención.

Es el caso de los gobiernos de los Estados Unidos, algunos países de Europa y Japón, los que han introducido tanto normas, códigos de construcción, incentivos tributarios y crediticios, sellos de calidad o rotulaciones energéticas, impuestos a las emisiones, como servicios de consultoría, fomento a la investigación y desarrollo, subvención de inversiones, etc. A lo anterior se agrega el desembolso de enormes cantidades de dinero por parte del Gobierno, las agencias especializadas y las empresas eléctricas, públicas o privadas, obteniendo como producto de estos esfuerzos importantes disminuciones del consumo y claros beneficios desde el punto de vista ambiental y económico.

Si bien la minería es importante en muchos países de la Región, tales como: Bolivia, Brasil, Chile, Jamaica, Perú y México, este documento utilizará como ejemplo el caso de la minería chilena del cobre, tanto por su importancia relativa como por el acceso a la información.

II. MARCO CONCEPTUAL DE LA POLITICA ENERGETICA PARA LA PROMOCION DEL USO EFICIENTE DE LA ENERGIA EN LA MINERIA

2.1 La energía y el crecimiento económico

Hasta principios de la década de los 70's, existía prácticamente un consenso respecto de la existencia de una estrecha correlación entre el consumo de la energía y el crecimiento económico. Es a partir de la crisis energética que dicho paradigma empieza a cuestionarse, en especial en los países industrializados, donde, a pesar de una cierta desaceleración relativa, el producto interno bruto continúa creciendo y el consumo de energía decrece como se muestra más adelante.

Sin embargo, a partir de mediados de los 70's, la evolución del sistema energético mundial estuvo marcada por las crisis petroleras de 1973 y 1979 y por una desaceleración del crecimiento de la economía mundial. En los países desarrollados, la amenaza de agotamiento y de encarecimiento de la energía, y la pérdida de dinamismo de la economía, se tradujo en una disminución de la tasa de crecimiento de la demanda de energía, superior a la que experimentó la tasa de crecimiento de la economía¹ y la cuestión energética constituyó una componente importante del debate internacional.

A fines de los 70's el factor político fue desplazado del debate por la dinámica innovadora y la introducción de agresivas políticas de uso eficiente de la energía, situación que se mantuvo durante los 80's. En la década de los 90's y probablemente la próxima, el medio ambiente y el efecto invernadero tomarán el relevo, lo que reforzará la importancia del uso eficiente de la energía y de las energías renovables.

Ello no ha ocurrido en América Latina y el Caribe, donde a excepción de Brasil, éste no ha sido un tema relevante; en efecto, la intensidad energética se mantuvo en torno a los 3 BEP/10³ US\$ de PIB en las décadas de los 70's y los 80's². No existen antecedentes que esta situación haya cambiado significativamente en lo que va corrido de los 90's.

¹ World Energy Council, "Energy for Tomorrow's World- the Realities, the Real Options and the Agenda for Achievement", WEC Commission, 15th WEC Congress, Madrid, Spain, September. 1992. Mientras en Norteamérica la intensidad energética disminuyó en un 31% entre 1970 y 1990, en Europa ella disminuyó en 26%.

² Pedro Maldonado, "Uso eficiente de Energía: Una opción estratégica para la protección del medio ambiente", Revista Energética, OLADE, Año 15, número 3, sept.-dic. 1991

En Chile, el crecimiento acelerado de la economía durante los últimos años, se ha traducido en una extraordinaria expansión de la demanda de energía secundaria total. En efecto, entre 1986 y 1992, ésta ha crecido a una tasa promedio anual de 7,7%³, mientras que el PIB creció a una tasa de 6,7%⁴.

En 1992, la demanda de electricidad del Sistema Interconectado Central creció en un 10,8%⁵ y la de los combustibles líquidos en un 8,1%⁶. La elevada tasa de crecimiento del parque de vehículos automotores⁷, el desarrollo industrial, el aumento del uso de la electricidad en la actividad productiva⁸ y la incorporación creciente de artefactos electro-domésticos en el sector residencial permiten suponer que la demanda de energía mantendrá la dinámica de los últimos años.

En el país y, en general en la Región, el enfoque convencional al problema energético se ha limitado a aumentar el abastecimiento, explotando los recursos hidroeléctricos, carboníferos y petrolíferos, mediante instalaciones cada vez más costosas, complejas y de mayor tamaño, opción que se está revelando inviable económica, técnica, ambiental y políticamente⁹.

Con el objeto de obviar los problemas que acarrearía la mantención de las tendencias actuales de expansión de la demanda de energía, se deberán identificar opciones alternativas para el abastecimiento de parte importante de los requerimientos energéticos que demandará el crecimiento económico de la Región; el uso eficiente de la energía

³ Comisión Nacional de Energía, "Balance de Energía, 1971-92, Chile", 1993

⁴ CIEPLAN, "Evolución del Producto por Regiones, 1960-1992", Santiago, Chile, septiembre 1994

⁵ CDEC-SIC, "Estadísticas de Operaciones, 1985-1993", Santiago, 1994

⁶ Comisión Nacional de Energía, Op cit

⁷ Acevedo, C. y Barría, P. "Uso de gasolina sin plomo en Chile" Actas 2° Congreso Nacional de Energía, Universidad de Concepción, Concepción, Chile 21 al 23 de abril de 1993

⁸ Tanto por sustitución de fuentes -el control de procesos y de la calidad de los productos es asegurada en mayor medida por la electricidad- como por aumento de la mecanización destinada a reducir los costos de la mano de obra.

⁹ Los elevados recursos que destina Chile al desarrollo del sector -habida cuenta del uso ineficiente que se hace de la energía-, podrían orientarse a satisfacer necesidades socialmente más urgentes. El gigantismo que ha caracterizado las instalaciones del sector durante los últimos años, se traduce, muchas veces, prácticamente en la introducción de prototipos, fabricados de a uno. El debate ambiental en torno a los proyectos energéticos se ha traducido en muchos casos, en los países industrializados, en el rechazo de los proyectos. En la región, en la medida que la sociedad civil ha ido adquiriendo mayor fuerza, una situación similar podría producirse.

constituye una de las opciones privilegiadas desde el punto de vista económico, de la equidad y de la sustentabilidad ambiental.

2.2 La energía y la sustentabilidad del desarrollo

Desde el punto de vista de la energía, la sustentabilidad del desarrollo presupone adoptar como nación, una estrategia que satisfaga los requerimientos de la actividad productiva, y que mejore la calidad de los servicios energéticos domésticos, enfatizando: (1) el uso eficiente de la energía; (2) el abastecimiento energético de los sectores marginados geográfica y/o económicamente; (3) las opciones energéticas que minimicen los impactos ambientales negativos; (4) la introducción de tecnologías limpias y eficientes para el uso de recursos nacionales como el carbón o la biomasa; (5) el desarrollo de las energías no convencionales; y (6) la flexibilización del sistema energético¹⁰.

En las etapas de extracción, transformación y generación, transmisión y transporte, y de uso de la energía se pueden producir impactos ambientales de importancia. En Chile, la contaminación atmosférica de Santiago y la discusión en torno a la construcción de grandes centrales hidroeléctricas están generando una resistencia creciente hacia los proyectos energéticos.

En términos generales, si los países no establecen una clara regulación al respecto, los usos de la energía en el transporte urbano o de los combustibles fósiles en la industria, agudizarán los problemas ambientales de la región, con una intensidad que dependerá de la tecnología utilizada, de la calidad del combustible y del estado de mantención de los equipos.

El abastecimiento chileno de energía depende en forma creciente de las importaciones. Entre 1970 y 1992 la dependencia energética nacional pasó de un 29% a un 37% (en 1990, debido a la sequía, ella llegó a un 41%). Esta situación es particularmente crítica en el caso del petróleo, ya que si bien su importancia relativa en el consumo primario de energía ha disminuido entre 1974 y 1992, de 52% a 40%, el petróleo importado ha pasado del 66% al 90% del consumo nacional¹¹. En el largo plazo, la dependencia energética tenderá a agudizarse si no se manejan adecuadamente los

¹⁰ Pedro Maldonado, "Energía y Equidad", Sustentabilidad ambiental del crecimiento económico chileno, Editor Osvaldo Sunkel, Programa de Desarrollo Sustentable, Centro de Análisis de Políticas Públicas, Universidad de Chile, Santiago, Chile, enero 1996

¹¹ Comisión Nacional de Energía, "Balance de Energía, Chile", Santiago, Chile, 1993.

recursos y no se adopta la eficiencia energética como una opción estratégica de desarrollo.

En Chile, como en otros países de la Región, existen graves problemas de equidad, lo que induce a pensar que si los frutos del crecimiento económico no se reparten equitativamente entre la población, la sustentabilidad del desarrollo se verá seriamente amenazada¹². Una de las áreas donde las desigualdades se hacen manifiestas, es en la satisfacción de las necesidades vinculadas al uso de la energía.

La disponibilidad de energía condiciona tanto la calidad de vida de la población como su productividad. El desabastecimiento absoluto o intermitente de este insumo afecta gravemente la calidad de vida de los sectores rurales -tanto a nivel doméstico como comunitario- marginándolos de ciertos usos considerados hoy en día como esenciales.

A nivel urbano, el problema más crítico es la calidad térmica y ambiental de las viviendas de los sectores de bajos ingresos, lo que repercute en problemas de salud y de disponibilidad de ingresos para satisfacer urgentes necesidades básicas.

2.3 Uso eficiente de energía versus desarrollo, un falso dilema

Habitualmente se argumenta que el uso eficiente de la energía no es una opción válida para los países en desarrollo, los que en vez de ahorrar energía deberían consumir más para mejorar la calidad de vida de la población y mejorar la productividad de sus actividades económicas. Reforzando este punto de vista, se señala que el consumo de energía per cápita de los países industrializados supera largamente el de los países de la Región¹³.

Sin embargo, el uso eficiente de la energía, entendido en su acepción más vasta, es decir, como la minimización de los requerimientos de energía por unidad de producto o de servicios, la selección de las fuentes más adecuadas en función de los recursos disponibles, la mecanización de las actividades de baja productividad y la flexibilización del abastecimiento (desarrollo de la cogeneración, entre otros), sí constituye una respuesta

¹² Luis Maira, Ministro de Planificación y Cooperación. Diario La Epoca, viernes 7 de abril de 1995.

¹³ De acuerdo a la publicación de la revista de OLADE ya citada, América Latina consume 3,5 veces menos energía por habitante que Europa Occidental y 7 veces menos que Estados Unidos.

efectiva e indispensable a los problemas energéticos de América Latina y el Caribe.

Como se señalara, en los países de la OCDE se produce una desaceleración del consumo de energía, la que se debe, en parte importante, a la decisión política de estos países de reducir su dependencia energética y, de este modo, atenuar los efectos de las crisis petroleras sobre sus economías. Para ello introdujeron las tecnologías de uso eficiente de la energía, diversificaron sus fuentes de abastecimiento y flexibilizaron su sistema energético, complementando y mejorando, de este modo, el funcionamiento de los mercados energéticos.

Entre 1972 y 1985, la intensidad energética, medida en BTU por unidad de PIB, se redujo en Estados Unidos de 24.600 a 17.300 y en Japón de 12.000 a 8.000, lo que es explicado, en parte, por la tercerización de la economía, pero, sobretodo, por la introducción de tecnologías y procesos eficientes energéticamente¹⁴.

Tanto los gobiernos, a través de regulaciones e incentivos, como los industriales y administradores de servicios públicos respondieron a los desafíos energéticos y ambientales mediante la introducción de equipos duales y multicombustibles, la masificación de la cogeneración, las turbinas de ciclo combinado y las tecnologías de pequeña escala.

2.4 El entorno económico, político e institucional que determina el uso de la energía

2.4.1 La reforma del sector energía

La crisis económica de los años 80, golpea con mucha fuerza al sector energía de la Región¹⁵, especialmente al subsector eléctrico. Ello lleva a algunos grupos políticos y algunos especialistas a cuestionar el esquema de desarrollo del sector y a promover su reforma, específicamente su privatización.

¹⁴ Maldonado, P., "Uso eficiente de energía: Una opción estratégica para la protección del medio ambiente", Revista Energética, Año 15, número 3, sept.-dic. 1991, OLADE, Quito, Ecuador.

¹⁵ De acuerdo con OLADE, presentación de su Secretario Ejecutivo en el Primer Congreso Nacional de Energía, organizado por la Universidad de Chile el año 1990, el sector energía absorbió un porcentaje elevado de la inversión pública de los países de la Región y fue responsable de parte importante de la deuda de la Región, a la fecha de su presentación, US\$ 80 mil millones.

Una parte importante de la crisis de las empresas energéticas se debe o debía a: tarifas fijadas políticamente por debajo de los costos; las devaluaciones realizadas en los años ochenta; el elevado costo financiero derivado del endeudamiento en que incurrieron las empresas para financiar sus inversiones, muchas veces presionadas por sus gobiernos¹⁶; las interferencias políticas en el manejo diario de las empresas; la dificultad creciente para financiar las inversiones del sector¹⁷; la falta de una separación clara de las funciones de planificación, regulación y operación, muchas veces concentradas en una misma institución.

La reforma del sector ha ido acompañada de una importante discusión acerca de su carácter estratégico para el desarrollo de los países, de la vocación de servicio público del subsector eléctrico, del rol del Estado, de los mecanismos de fijación de precios, del alcance e importancia del aparato regulador, de las condiciones necesarias para asegurar la competencia en el sector privatizado, etc. El deterioro o agotamiento de los recursos energéticos, la contaminación atmosférica causada por la producción y uso de la energía y el uso eficiente de energía no constituyeron aspectos centrales en el proceso de reforma del sector.

Más aún, en lo que respecta a este último punto, hay quienes consideran la eficiencia energética como una amenaza; ya que es visualizado como un mecanismo destinado a reducir las ventas de energía y, por ende, las utilidades de las empresas.

En cambio otros señalan que la liberalización de los mercados, contribuye al mejoramiento de la eficiencia con que se utiliza la energía. En efecto, quienes defienden esta postura afirman que los precios de los combustibles, determinados por los precios de paridad con el mercado internacional, y los precios de la electricidad definidos por los costos marginales de producción en un mercado competitivo, envían señales al mercado que aseguran la optimización social en el uso de los recursos¹⁸.

¹⁶ Fue el caso de algunas empresas eléctricas consideradas solventes, técnica y económicamente, por las agencias multi y bilaterales de financiamiento. Ello impulsó a los gobiernos a utilizarlas como fuente indirecta de financiamiento para otras actividades que no obtendrían respaldo de dichas agencias.

¹⁷ De acuerdo con la publicación "Power Supply in Developing Countries: Will Reform Work", proceedings de la mesa redonda co-patrocinada por el Banco Mundial y Electricité de France, Washington D.C., abril 27-28, 1993, los países en desarrollo necesitarían US\$ 100.000 millones anuales para el subsector y las agencias multi y bilaterales sólo disponen de un 10% de esta cifra para estos fines.

¹⁸ Las barreras que impiden el pleno funcionamiento del mercado, limitarían la eficacia de las señales enviadas al mercado por los precios "reales", los que al no incluir las externalidades no

En principio, es posible distinguir entre la eficiencia energética inducida y aquella que el mercado introduce en forma espontánea. La primera, deriva de las políticas explícitas de eficiencia energética de los gobiernos y de los usuarios que buscan mejorar su productividad recurriendo a las tecnologías energéticamente eficientes. Por el contrario, la segunda corresponde a la mejora de eficiencia que viene incorporada en los equipos que los países importan y que responden a estándares exigidos por los países donde dichos equipos son fabricados; en consecuencia este tipo de mejora no responde ni a una política nacional ni a la voluntad del usuario de incorporar tecnologías destinadas a reducir económicamente la incidencia de la energía en sus costos de producción.

2.4.2 Políticas económicas, energéticas y ambientales

La liberalización de los mercados aplicada con mayor o menor rigor en los distintos países de la región condiciona el alcance y la efectividad de los distintos mecanismos. Entre ellos se pueden señalar:

a) La política fiscal y arancelaria

La tendencia en la mayoría de los países de la región es hacia el establecimiento de aranceles parejos y reducidos. Ello atenta contra la posibilidad de establecer aranceles preferenciales para los equipos eficientes energéticamente, pero por el contrario, los aranceles reducidos, facilitan la importación de dichos equipos, los que se compararían, en estas condiciones, en forma favorable con los equipos estándar fabricados localmente.

El empleo de mecanismos fiscales, como podría ser el establecimiento de una depreciación acelerada en el caso de equipos eficientes energéticamente, constituye un incentivo importante para la adquisición de este tipo de equipos.

Este enfoque, según algunos, presenta ventajas respecto al establecimiento de normas, muy utilizado en muchos países industrializados, debido a que este último congela u orienta la selección de tecnologías¹⁹.

serían tan reales.

¹⁹ Comunicación personal del profesor Gustav Obermair de la Universidad Regensburg, Santiago, Chile, 14 de marzo de 1995

b) Política ambiental

La política ambiental constituye uno de los mecanismos más importantes para la introducción y difusión de las tecnologías de eficiencia energética. En efecto, la reducción de las emisiones está estrechamente vinculada a la eficiencia con que se usa la energía en hornos y calderas; así mismo, influyen positivamente en el consumo de energía las medidas de gestión del transporte urbano en las ciudades que tienen una elevada congestión vehicular y problemas de contaminación.

La internalización de las externalidades²⁰ tanto en la fijación de los precios de los combustibles como en la evaluación de proyectos energéticos alternativos, reforzará las ventajas comparativas del uso eficiente de energía y mejorará las condiciones de competitividad de las energías renovables.

c) Normas, estándares de consumo, sellos de calidad e incentivos a la calidad

Las normas y estándares de consumo de los artefactos de uso doméstico constituyen un vehículo importante para el mejoramiento de la eficiencia de uso de la energía. En los Estados Unidos, la constante evolución de las normas de refrigeradores ha permitido reducir los consumos específicos de estos artefactos, desde 1990 a 1993 en 28%²¹; el resto de los aparatos electrodomésticos -aunque han sido objeto de menos esfuerzo normalizador, debido a su menor incidencia en el consumo- igualmente constituyen una fuente importante de economías de energía²².

Los sellos de calidad tienen por objeto incorporar los mecanismos de mercado a la eficiencia energética. El gobierno federal de los Estados Unidos ha impuesto a los fabricantes de aparatos electrodomésticos la exigencia de incorporar un sello que indique el consumo efectivo del artefacto y el exigido por las normas²³. En Europa, la calidad térmica de las viviendas y edificios se está constituyendo en un argumento de ventas.

²⁰ La internalización de las externalidades tiene por objeto incorporar en los precios de los energéticos sus impactos ambientales. En la medida que ello se lleve a cabo, aunque sea parcialmente, los precios de la energía se acercarán a los precios reales.

²¹ U.S. CONGRESS, OFFICE OF TECHNOLOGY ASSESSMENT, "Energy Efficiency: Challenges and Opportunities for Electric Utilities", Washington, USA, September 1993

²² Las normas de Estados Unidos incluyen además freezers, acondicionadores de aire, bombas de calor, termos de agua caliente, hornos y ballasts. Ibid

²³ U.S. CONGRESS, OFFICE OF TECHNOLOGY ASSESSMENT, opus cit, 1993

Adicionalmente a las normas y sellos de calidad, los gobiernos pueden generar incentivos destinados a fabricar equipos de alta eficiencia, un ejemplo de este tipo de mecanismos es el *Golden Carrot*²⁴.

d) Políticas de precios de la energía

Históricamente, los países consideraron que los precios subsidiados de la energía contribuían a la equidad y a promover el desarrollo de la industria nacional. La experiencia demostró que los subsidios no satisfacían ni uno ni otro objetivo, y que la sustentabilidad del sector energía requería de precios "reales"²⁵. Dichos precios "reales" de la energía constituyen una condición necesaria pero no suficiente para lograr una adecuada penetración de las tecnologías energéticamente eficientes y que, para las condiciones específicas de los países, presentan una elevada rentabilidad²⁶.

La eficiencia energética requiere de un sistema de precios de la energía que refleje los efectivos costos que ella tiene para la sociedad y de un conjunto de mecanismos e incentivos destinados a superar las barreras que impiden el pleno funcionamiento del mercado en este caso.

2.4.3 Contexto institucional

A pesar que muchos economistas clásicos y neoclásicos tienden a rechazar la existencia de barreras que impidan el pleno funcionamiento del mercado en la asignación de recursos al uso eficiente de energía²⁷, existe un consenso entre los especialistas que hay un conjunto de obstáculos de tipo institucional, económico y técnico que frenan la difusión y masificación de las tecnologías energéticamente eficientes (ver recuadro II-1²⁸).

²⁴ 25 empresas eléctricas de Estados Unidos y la EPA financiaron un premio para el ganador de un concurso de diseño de un refrigerador de alta eficiencia energética, libre de CFCs; el premio permitía al ganador financiar los gastos de I&D del refrigerador y las empresas eléctricas se comprometieron a distribuir dichos refrigeradores en sus áreas de concesión (las empresas abastecían a un cuarto de la población de los Estados Unidos).

²⁵ Los precios "reales" corresponden a aquellos definidos por el mercado, pero no incluyen las externalidades, lo que se traduce, desde el punto de vista social, en un sistema de precios distorsionados.

²⁶ Maldonado, P., Lutz, W., Espinoza, J., Navarrete, P. y Serrano, P., "Fuentes no Convencionales y Uso eficiente de la Energía: Situación actual y perspectivas", Cáp. IV CNE, 1994

²⁷ En este documento, cuando se habla de eficiencia energética, se está refiriendo a la introducción de medidas o tecnologías que presentan una rentabilidad interesante para el usuario.

²⁸ PRIEN, "La política de uso eficiente de la energía. ¿Es el mercado el motor de dicha política?", Unidad de Recursos Naturales de la División de Medio Ambiente y Recursos Naturales de la

Recuadro II-1
Barreras al uso eficiente de la energía en el sector industrial y minero

Las principales barreras que estarían obstaculizando la eficiencia con que se usa la energía en la industria y la minería serían las siguientes:

- salvo en el caso de las empresas energo-intensivas (empresas en que la energía constituye un componente importante del costo de producción), para el resto de las empresas, la factura energética representa un porcentaje reducido de sus costos, lo que no constituiría un incentivo para destinar sus escasos recursos técnicos a identificar y evaluar tecnologías que no constituyen su área de especialización ni el objetivo de su actividad
- vinculado a lo anterior, existe una cierta reticencia por adoptar tecnologías poco difundidas a nivel nacional
 - como el mercado nacional es incipiente, no sólo los vendedores de equipos no están familiarizados con ellos sino que además, no existen en stock
 - se pondera excesivamente, muchas veces sin suficiente análisis técnico, la seguridad de servicio por sobre la eficiencia energética
 - las razones anteriores se traducen en una oferta claramente insuficiente de profesionales especializados en auditorías energéticas, ingeniería de diseño en esta área e instaladores de estas tecnologías. En efecto, si no se establecen los incentivos destinados a superar las barreras al uso eficiente de energía, no existirá suficiente demanda por estos servicios y, por ende, no habrá interés por parte de los profesionales en especializarse en este campo. En Chile, según el Ing. Lautaro Cárcamo, algunas empresas de ingeniería abandonaron esta área debido a que no había suficiente demanda.

Los intereses en juego determinan no sólo la posibilidad de avanzar en el establecimiento de programas de uso eficiente sino que también en la definición de las alianzas tácticas -¿o estratégicas?- para materializar las significativas potencialidades de mejoramiento de la eficiencia energética que presenta el país.

En este contexto, debe considerarse el peso específico de las empresas energéticas de la mayoría de los países de la región y la importancia de conquistar su apoyo a este tipo de programas. En la región, las organizaciones no gubernamentales no constituyen aún, aunque esta situación está cambiando, un poder político de importancia, debido a que no han alcanzado la madurez y desarrollo que ellas tienen en los países industrializados.

Al interior de los gobiernos existen igualmente posturas contrapuestas, lo que no significa que exista oposición hacia el concepto del uso eficiente de energía sino que dichas posiciones giran en torno a más o menos regulación.

En la mayoría de los países de la Región, la insuficiente capacidad de los grupos de investigación para adaptar, evaluar y desarrollar tecnologías energéticamente eficientes y lo limitado de los recursos que se destinan a este objeto unido a la falta de orientaciones por parte de los organismos responsables del desarrollo científico y tecnológico de la mayoría de los países del área conspira contra el reforzamiento de dicha capacidad. En este contexto, cuando las agencias de gobierno solicitan los servicios de las universidades o institutos de investigación, normalmente lo hacen en torno a problemas puntuales, en que el largo plazo aparece como ausente de sus preocupaciones.

A su vez parece indispensable que el tema se introduzca en la educación formal y en los programas de capacitación. En el caso chileno se han realizado esfuerzos por incorporar el tema en la educación básica, media y profesional, en vistas a generar una cultura nacional respecto del tema.

En la enseñanza superior el tema debería aparecer recurrentemente en las ciencias básicas y aplicadas, en especial, aunque no exclusivamente, en las carreras de ingeniería, arquitectura y construcción, lo que hasta la fecha constituye más bien la excepción que la regla.

Además de la educación formal, es fundamental que los programas de capacitación de la mano de obra y los de educación continua incorporen estas materias como un componente importante de sus cursos. Un énfasis particular se deberá dar a la capacitación de obreros, supervisores y profesionales de la construcción así como de aquellos vinculados a la operación, selección e instalación de hornos y calderas industriales.

Por último, dada la vinculación del uso eficiente de la energía con los temas ambientales que preocupan a las agencias multilaterales y los países industrializados, cabe suponer, que en estas áreas, los países de la Región recibirán el apoyo técnico y financiero necesario para abordar proyectos de investigación y desarrollo, reforzar la institucionalidad e, incluso, asistencia técnica a los sectores productivos en temas vinculados a la eficiencia energética²⁹.

Desde esta perspectiva, es posible señalar la presencia en algunos de los países de la Región de la agencia de cooperación técnica alemana (GTZ), de la Unión Europea, del Departamento de Energía (DOE) de Estados Unidos, del

²⁹ Aunque algunos de los países de América Latina, dada su situación económica, han dejado de ser, en principio, países receptores de la cooperación internacional.

proyecto Global Environment Facility (GEF) que administran el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y el Banco Mundial, en que la componente uso eficiente es fundamental. Este tipo de cooperación tenderá a reforzarse en el futuro, aún cuando los énfasis y las formas de colaboración cambien en la medida que se pase de los estudios de base y la definición de políticas a la implementación de las medidas.

2.5 La importancia de la minería en la Región y los desafíos de la globalización

El sector minería, en muchos de los países de la Región, no sólo constituye un componente clave del PIB sino que muy especialmente de sus exportaciones totales³⁰. En efecto, los cuadros siguientes resumen la importancia de la Región en el comercio mundial de muchos de los principales minerales que se transan en el mercado internacional, y la participación de la minería en el Producto Interno Bruto y las exportaciones totales de algunos países de la Región.

Cuadro 2.1

Participación porcentual de América Latina y El Caribe
en el comercio mundial de minerales (año 1992)

MINERAL	Total mundial (en US\$ millones)	A. Latina y Caribe (en US\$ millones)	Región (en %)
Bauxita	803	288	35,9
Alumina	4.078	888	21,8
Aluminio	12.985	1.691	13,0
Cobre blister	1189	615	52,6
Cobre refinado	8.874	3.196	36,0
Estaño metálico	1.135	203	17,9
Niquel (unwrought)	3.025	453	15,0
Plomo mineral	326	98	30,1
Plomo metálico	913	91	10,0
Zinc mineral	2.105	561	26,7
Zinc metálico	3.283	269	8,2

Fuente: Fernando Sánchez Albavera, Unidad de Recursos Naturales de CEPAL, "Las Reformas Mineras y los desafíos de la globalización", LC/R. 1464, octubre 1994, en base a UNCTAD, Commodity Yearbook 1986, 1992, 1994.

³⁰ En el caso chileno, en 1992 las exportaciones de la minería representaron del orden de un 48% del total de las exportaciones del país. Isabel Figueroa, "Inserción de Chile en la economía mundial: Tendencias recientes", Dirección General de Relaciones Económicas Internacionales, Ministerio de Relaciones Exteriores, Chile, noviembre 1993.

El cuadro siguiente permite visualizar el aporte de la actividad minera al PIB de algunos países de la Región.

Cuadro 2.2
América Latina y el Caribe: participación de la minería en el PIB
(en %)

Países	1990	1991	1992	1993	1994
Bolivia	9,8	7,2	6,0	5,6	5,5
Brasil	2,1	1,8	1,8	1,8	1,2
Chile	9,6	9,4	8,6	8,2	8,0
Colombia	9,3	8,2	6,8	5,5	4,3
Perú	2,4	1,8	1,9	1,8	1,9
Venezuela	23,3	18,2	15,7	15,3	16,3
Guyana	10,1	15,6	11,3	20,7	21,7
Jamaica	9,2	10,7	9,4	6,5	7,3
Suriname	3,3	2,6	2,2	2,6	- -
Trinidad Tobago	21,3	17,1	15,4	14,4	14,4

Fuente: Cepal, División de Estadística y Proyecciones Económicas. anuario Estadístico de América Latina y el Caribe, edición 1995

Notas: 1) Sobre la base de precios corrientes a la excepción de Chile
2) Incluye la extracción de petróleo

El cuadro siguiente presenta la importancia relativa de las exportaciones mineras en el total de las exportaciones de algunos países de la Región.

Cuadro 2.3
Participación de las exportaciones mineras en las exportaciones totales
(en %)

Países	1991	1992	1993	1994
Bolivia	41,8	53,2	47,2	42,4
Brasil	8,2	6,6	5,8	5,3
Chile	49,3	47,2	43,2	45,0
Colombia	15,7	14,4	13,2	10,8
México	3,2	2,8	2,5	2,4
Perú	46,0	49,4	44,3	45,2
Venezuela	6,4	6,7	7,0	7,6

Fuente: CEPAL, Estudio Económico de América Latina y el Caribe, 1994

De acuerdo con la publicación de la CEPAL antes citada, y desde la perspectiva de este trabajo, la minería de la Región deberá enfrentar

desafíos de importancia que guardan relación con: el menor dinamismo de la demanda de los minerales y metales en el comercio mundial, mejorar su competitividad, incorporar el progreso técnico y conceder a la variable ambiental la misma o similar importancia que le asignan sus socios comerciales.

En efecto; entre 1970 y 1992 la participación de los minerales y metales en el comercio mundial disminuyó de 7% a 3%, lo que se debe a la pérdida de dinamismo del consumo de metales en el mismo período. Son particularmente destacadas las reducciones del ritmo de crecimiento del aluminio y cobre refinados, los que de un crecimiento anual de 9% y 4%, respectivamente, al comienzo del período pasaron a 2%, en ambos casos. Dicha pérdida de participación en el comercio mundial se debe también a una caída en los precios, particularmente a partir de los años 80's, la que es especialmente marcada en los casos del estaño, oro, plata, plomo y zinc durante la presente década³¹.

La reducción de los costos de producción pasa a ser un desafío de la primera importancia. Ello presupone aprovechar las economías de escala (se vincula a la intensidad de capital y las estrategias de apertura al capital extranjero), acumular sistemáticamente progreso técnico, definir estrategias de especialización en las distintas etapas del proceso productivo, mejorar la eficiencia con que se usan los insumos y, en particular, la energía.

En el caso del cobre, es de destacar el progreso tecnológico que caracteriza la actividad durante los últimos veinte años; el convertidor modificado El Teniente, el horno Flash (diseño Outokumpu e Inco)³², la lixiviación en pilas de minerales oxidados y mixtos junto a la extracción por solventes, y la lixiviación bacteriana. Estos procesos han permitido aumentar la recuperación de los ripios o minerales de baja ley, reducir los costos de producción e incrementar la productividad, además de reducir la contaminación ambiental³³.

³¹ María Chappuis, "Competitividad e incorporación del progreso técnico en la minería de oro y cobre", Unidad de Recursos Naturales y Energía, División de Medio Ambiente y Desarrollo de CEPAL, LC/R. 1592, Santiago, 31 de diciembre de 1995

³² El convertidor modificado El Teniente, permite reducir significativamente el consumo de energía, siendo superado en este aspecto por el Horno Flash.

³³ Fernando Sánchez Albavera, "Las reformas mineras y los desafíos de la globalización", Seminario Regional sobre Modernización de la Legislación Minera en América Latina y El Caribe, CEPAL, LC/R. 1464, Santiago, 26 de octubre de 1994.

Recuadro II-2

Evolución tecnológica reciente en la explotación del cobre³⁴

El gran cambio en curso, es el desarrollo creciente de la hidrometalurgia en reemplazo de los procesos tradicionales de flotación y fundición. La hidrometalurgia consiste en la extracción y refinación del mineral en soluciones acuosas.

La lixiviación trata minerales oxidados, óxidos de baja ley y ripios sulfurados. En general, se usan soluciones diluidas de ácido sulfúrico para la lixiviación, la cual puede realizarse en pilas, in situ (en la mina misma, tajo abierto o subterránea) o en mineral en bateas que ha sido previamente chancado.

El producto de la lixiviación (solución que contiene cobre en reducida proporción) es sometido a la extracción por solventes (SX) utilizando un reagente orgánico (LIX) y la remoción del cobre del LIX en una solución electrolítica de H₂SO₄ diluida y sulfato de cobre. El electrolito se bombea a la planta de electrorrefinación (EW, electrowinning) donde el electrolito es recuperado como cátodos de cobre fino. La principal diferencia entre este proceso y la refinación electrolítica convencional es que esta última utiliza ánodos de cobre, mientras que la electroobtención utiliza la solución proveniente de la extracción por solvente.

La hidrometalurgia permite flexibilizar las escalas de producción, reducir significativamente los costos³⁵ y reducir significativamente la contaminación atmosférica al eliminar la etapa de fundición. En Chile, la hidrometalurgia, incipiente en los años 80, alcanzará a un 42% de la producción nacional de cobre fino al año 2000. Debido a la eliminación de la fase fundición, este proceso se traduce en una reducción importante de los consumos de combustibles fósiles, y su reemplazo por electricidad.

En términos generales las tecnologías más recientes ponen el acento en la mejora de la eficiencia y reducción de la contaminación: uso de oxígeno en los hornos de fusión, la inyección de concentrados secos en los hornos, la molienda y fusión semiautógena, la fusión en horno flash, los cambios en el diseño de los sistemas de flotación, el uso de cátodos de acero en la electrorrefinación y electro-obtención, la utilización extensiva de los sistemas de control de procesos, etc.

De hecho, de acuerdo a lo señalado por María Chappuis³⁶, "en la década de los 80's el proceso SX, al combinarse con la lixiviación con ácido sulfúrico y la EW, se convirtió en la tabla de salvación para la minería del cobre de Estados Unidos, acosada por las regulaciones ambientales y los bajos precios internacionales de los metales".

³⁴ Ibid, y Felipe Valdés y Edgar Hertwich "The Energy Efficiency potential of San Manuel Copper Mine and Processing Plant in San Manuel, Arizona", Princeton University, 1993.

³⁵ Prácticamente todos los proyectos hidrometalúrgicos tienen costos del orden de \$ 40/lb o menos, menores que los costos actuales de la minería convencional del cobre en Chile.

³⁶ María Chappuis, op cit, 1995

La protección del medio ambiente ha dejado de ser un problema local para transformarse en un problema regional y planetario. Atrás han ido quedando las prácticas de las chimeneas altas que exportaban la contaminación a los países vecinos y la preocupación mundial se centra cada vez con más fuerza en el cambio climático global, del cual no están exentas directa o indirectamente las explotaciones mineras de la Región.

La apertura de las economías latinoamericanas, estrategia de desarrollo adoptada crecientemente por los países de la Región, les impondrá adoptar políticas ambientales aceptables para sus socios comerciales, los que amenazarán cada vez con más fuerza de aplicar "barreras verdes" a las exportaciones regionales en caso de que no adopten tecnologías limpias en sus procesos productivos .

Los procesos semiautógenos, la hidrometalurgia y la eficiencia energética no solamente responden a los requerimientos de mejora de la competitividad sino que también a las exigencias medio ambientales de la población y de dichos socios comerciales actuales o potenciales.

2.6 La energía y la minería

La energía constituye uno de los insumos principales de la actividad minera. De hecho, especialmente en el caso de la minería metálica, esta actividad se considera dentro de las llamadas energo-intensivas o energívoras³⁷. Incluso, la producción de aluminio, en principio, no siempre se concentra en los países ricos en bauxita³⁸ sino en aquellos que disponen de electricidad en abundancia y a costos reducidos, como es el caso, típicamente, de Canadá.

Si bien la producción de acero, cobre, aluminio y otros metales se caracteriza por su elevado consumo de energía, éste puede reducirse significativamente dependiendo de si ella se realiza a partir de mineral o chatarra, se inyecta oxígeno al proceso de fusión, se reemplaza la colada convencional por la colada continua, se utilizan procesos autógenos o

³⁷ En términos generales, desde la extracción del mineral a la producción de cátodos de cobre se requieren por ton 30 GJ de energía en sus distintas formas, 5 veces lo que requiere el hierro y del orden de un tercio de lo empleado en producir aluminio.

³⁸ Existen excepciones como la antigua Unión Soviética, Australia, Estados Unidos (su producción minera actual está en franca declinación), Venezuela y Brasil, que combinan producción de bauxita y de aluminio. Incluso, en algunos de estos países se produce en términos relativos más aluminio que bauxita.

semiautógenos o se introducen cambios en los procesos como los señalados en el recuadro II-2.

En los países industrializados la disponibilidad de chatarra es significativamente mayor que en los países en desarrollo lo que permite a los primeros recurrir a la producción de metales de fusión secundaria a bajo costo y utilizando menos energía³⁹.

De acuerdo a estudios realizados, a pesar de los logros ya alcanzados mediante la introducción de tecnologías energéticamente eficientes, existen significativas potencialidades de reducción de la intensidad energética en los países industrializados⁴⁰, lo que se debería traducir en aún mayores reducciones en los países de la Región, con menos tradición en la búsqueda de reducciones en el consumo específico de energía, y más incipientes o inexistentes políticas de eficiencia energética.

Los logros alcanzados por los países industrializados se deben a un esfuerzo conjunto de las empresas, el Estado, los grupos de investigación, la competencia internacional y la presión ciudadana. En la Región, en que el desarrollo tecnológico es más incipiente y la competencia empieza a adquirir importancia, el Estado debe jugar un rol fundamental si se pretende materializar las significativas potencialidades de mejora de la eficiencia energética tanto a nivel nacional como, en particular, en la actividad minera.

³⁹ En Estados Unidos, la chatarra corresponde a un 60% de las materias primas utilizadas para producir acero y su uso reduce en un 50% el consumo de energía en relación a los procesos convencionales.

⁴⁰ Utilizando el estado del arte de las tecnologías para producir acero la Unión Europea podría reducir su consumo de energía por tonelada en 38%, Estados Unidos en un 51%, Japón en un 26% y Brasil en un 36%. World Energy Council, "Efficient Use of Energy Utilizing High Technology, An Assessment of Energy Use in Industry and Buildings", September 1995

III. BASES PARA EL DISEÑO DE PROGRAMAS DE EFICIENCIA ENERGETICA EN LA MINERIA

La eficiencia energética aparece como una de las opciones más atractivas para abordar los problemas medioambientales y de pérdida de competitividad de la minería regional, y de rentabilización de una actividad que pierde importancia en el comercio mundial⁴¹.

A pesar de que en esta actividad se han detectado significativas potencialidades de mejora, no se han adoptado las medidas destinadas a su concreción. En general, salvo los cambios de proceso, muchas de las medidas identificadas requieren de inversiones reducidas, cuya recuperación se alcanza en un tiempo reducido, lo que implica elevadas tasas internas de retorno, muchas veces superiores a aquellas que se realizan en otros ámbitos de la empresa minera.

A continuación se esbozan, en forma somera, las bases para el diseño de programas de eficiencia energética al interior de las empresas mineras.

3.1 Evaluación de las potencialidades de mejoramiento de la eficiencia de uso de la energía

Un programa de eficiencia energética al interior de una empresa de la envergadura de las empresas mineras que lideran la actividad del sector en la Región, requiere de una evaluación integral de las potencialidades de mejoramiento de la eficiencia existentes en la empresa. Dicha evaluación debe enfatizar las potencialidades alcanzables, mas bien que las potencialidades técnicas, enfoque socorrido en la literatura especializada estadounidense.

En efecto, las potencialidades técnicas están basadas en la adopción de las tecnologías de punta disponibles comercialmente en el mercado o más comunmente en el estado del arte de cada tecnología. Las potencialidades económicas, por su parte, analizan la viabilidad económica de introducir las tecnologías comercialmente desarrolladas, bajo las condiciones de precio y de uso de la energía, vigentes en el país objeto del análisis. Las potencialidades alcanzables agregan al concepto de rentabilidad de las

⁴¹ Mientras los minerales y metales pasaron de un 7,3% a un 3,1% del comercio mundial de bienes entre 1970 y 1992, los productos manufacturados lo hicieron de un 60,9% a un 73,5%. Por su parte, el índice de precios de los minerales (base 1985) pasó de 105 a 110 entre 1982 y 1992 y el índice de exportaciones manufacturadas de 104 a 159, en el mismo período. UNCTAD, Handbook of International Trade and Development Statistics, 1992

tecnologías, la tasa de penetración de las mismas, en función de la realidad de los distintos sectores usuarios, las normativas vigentes y los incentivos para su difusión⁴².

Para la evaluación de las potencialidades, se identifican las áreas que conjugan simultáneamente un porcentaje significativo de los consumos de la empresa con usos donde los ahorros, sin desmejorar los servicios prestados por la energía, son posibles. Ello presupone realizar un análisis de la estructura del consumo de energía por usos, el conocimiento de dicha estructura permite evaluar posibles sustituciones de combustibles e introducir tecnologías energéticamente eficientes en reemplazo de las estándar.

A partir de la estructura del consumo de energía por usos se identifican y evalúan las tecnologías energéticamente eficientes utilizables en la minería. El método que normalmente se utiliza para evaluar las tecnologías de reemplazo, consiste en estimar el costo de ahorrar energía y compararlo con las tarifas o precios que la minería paga por la energía. Dicho costo de ahorrar energía, se calcula considerando el costo anualizado del diferencial o el total del capital⁴³ más los costos diferenciales de operación y mantención, dividido por el ahorro de energía.

Con estos antecedentes y la definición de las tasas de penetración se determinan las potencialidades de ahorro, las que en conjunto con la estimación de la rentabilidad de las inversiones requeridas para su materialización son fundamentales para iniciar el proceso de incorporar este tipo de inversiones en la planificación estratégica de la empresa.

3.2 Identificación de los criterios que determinan las inversiones en equipos usuarios de energía.

Las inversiones en eficiencia energética hasta la fecha, no han constituido un objetivo por sí mismo, sino que ellas se han asociado a mejoras del control del proceso y, por ende, a la calidad de la producción, reducción de las emisiones contaminantes, mejora de la competitividad e incorporación

⁴² Estos conceptos se aplican tanto a las instalaciones nuevas como a las existentes. es evidente que en las instalaciones nuevas las potencialidades económicas y alcanzables son mayores que en el caso de las existentes, debido a que en el primer caso se trata de rentabilizar el diferencial del costo de la inversión (los equipos energéticamente eficientes son normalmente más costosos que los equipos estándar)

⁴³ Dependiendo de si se trata de evaluar un proyecto nuevo o la alternativa de una reparación mayor versus adquirir un equipo eficiente.

de progreso técnico. En consecuencia, los criterios que determinan las inversiones en este tipo de tecnología, deberán tener en cuenta que:

- la seguridad de servicio es más importante que el ahorro de energía,
- en la minería, probablemente más que en otros sectores, se acostumbra a sobredimensionar, a veces más allá de lo necesario, los equipos, entre otras razones porque la dureza del mineral varía,
- el control del proceso es fundamental y en ciertos casos, la eficiencia es un subproducto,
- los equipos deben responder a variaciones de flujo, muchas veces importantes
- la optimización de un área dada puede no necesariamente corresponder a la optimización del conjunto
- muchos equipos vienen con los motores incorporados y no siempre es posible la sustitución de estos últimos
- los proyectos llave en mano impiden a los especialistas en el tema incorporar equipos eficientes energéticamente.

3.3 Diseño de la institucionalidad requerida para promover la eficiencia energética

En la mayoría de los casos, la organización empresarial está adaptada exclusivamente a los requerimientos de la producción de minerales y no, también, al uso eficiente de energía. Esto significa que ni el personal tiene la formación para gestionar la energía ni tampoco hay una unidad cuyo objetivo fundamental sea velar por el uso óptimo de este recurso. Incluso, no es habitual que alguien ascienda en la organización porque se ha especializado y destinado parte importante de su carrera a manejar adecuadamente la energía que se consume en la planta.

En consecuencia, si se desea explotar este yacimiento de eficiencia energética se deberá partir por capacitar a un grupo de profesionales para que estén en condiciones de identificar potencialidades y las tecnologías más adecuadas, evaluar la viabilidad técnica y económica de introducir dichas tecnologías, operar y mantener las nuevas tecnologías y gestionar el uso de la energía en la planta.

A los responsables de ese grupo se le deberá conceder la autoridad y los recursos necesarios para que cumplan a cabalidad sus funciones, al mismo tiempo que generar una organización que coordine, bajo su responsabilidad, la gestión de la energía al más alto nivel operativo y de gestión, incorporando los responsables de las distintas áreas involucradas: ingeniería, finanzas, producción, contabilidad, control de calidad, por

ejemplo.

Al mismo tiempo se deberán generar incentivos para el cumplimiento de su labor, no solamente al nivel de los especialistas del área sino que, muy especialmente, de los sectores usuarios de los servicios de la unidad de eficiencia energética. Particularmente, cuando las tendencias modernas de la administración tienden a descentralizar la gestión de las distintas unidades productivas, éstas deberán beneficiarse y ver reflejados en sus resultados operacionales las mejoras en el uso de la energía.

3.4 Definición de los programas de uso eficiente de la energía

Los programas de uso eficiente de energía no son diferentes de otros tipos de programas que se implantan al nivel de la empresa, por lo que no vale la pena extenderse en ellos⁴⁴. De todas maneras, conviene señalar la importancia de los proyectos demostrativos para vencer las resistencias internas a la introducción de cambios que pueden verse como traumáticos o cuyos resultados no son evidentes para la mayoría de los especialistas de la empresa.

⁴⁴ Normalmente, se definen objetivos, metas físicas totales y por áreas de la empresa, recursos humanos y financieros, presupuestos monetarios para energía por áreas, responsables del programa global y de su implementación por área, programas de capacitación, sistemas de información de resultados, y sistemas de incentivos, seguimiento, control y evaluación.

IV. PROCESOS Y AREAS DONDE DEBERA CONCENTRARSE LA ATENCION DE LOS PROGRAMAS DE EFICIENCIA ENERGETICA EN LA MINERIA

Desde el punto de vista de la eficiencia energética, en la minería hay varias opciones o enfoques para atacar el problema:

- Cambio de proceso; como por ejemplo cambiar de horno de reverbero a convertidor modificado El Teniente u horno flash.
- Optimización del proceso; mediante, por ejemplo, un ajuste fino de la cantidad de oxígeno agregada en la carga de los hornos de fundición, y aumento de la recuperación de cobre de las escorias o de los rípios
- Mejoramiento de la eficiencia de los motores: reemplazo de los motores viejos (de bajo rendimiento y por rebobinar), bombas y ventiladores por modelos eficientes.
- Mejora al nivel de los sistemas usuarios; minimización global de pérdidas en sistemas de transporte o flujo de materiales o fluidos, dimensionamiento adecuado de motores en función de las cargas efectivas del sistema, aplicación de sistemas de ajuste de velocidad (ASD) en equipos de flujo variable, reemplazo de camiones por correas transportadoras.

4.1 Explotación minera

La explotación minera consiste en la extracción y transporte del mineral desde minas a tajo abierto o subterránea a los centros de concentración del mineral. La lixiviación in situ, mediante percolación de soluciones ácidas diluidas permite obtener minerales disueltos, reduciendo los consumos de energía vinculados a la faena minera y al transporte de minerales que contienen 98% a 99% de estéril. Igualmente, es posible reducir los costos de transporte de mineral y, por ende, de energía realizando operaciones de chancado y molienda al interior de la mina.

La ventilación de las minas subterráneas, las faenas de perforación, el bombeo de agua y pulpas, y el transporte de minerales concentran parte importante de los consumos de electricidad de la mina; los que en el caso de una importante mina subterránea chilena tipo superan el 10% del total de la energía consumida por la empresa.

A su vez, estas actividades presentan importantes potencialidades de mejora debido a que se utilizan grandes sistemas de ventilación y aire comprimido, los que por abastecer cargas variables, entran en el tipo de aplicaciones privilegiadas para los sistemas electrónicos de ajuste de

velocidad (ASD), lo que posibilita elevados ahorros de electricidad, ya que las reducciones del flujo se traducen en reducciones de la potencia que no son lineales sino cúbicas. su introducción estará condicionada económicamente al régimen de carga y las horas de uso del equipo (debido a lo elevado de la inversión), para motores de 100 a 500 HP, el costo del ASD se estima en US\$ 100/HP. Además, vinculada o no a la incorporación de los ASD, la importancia del uso de motores eléctricos en la mina, genera una potencialidad adicional de ahorro, en la medida que la introducción de motores eficientes sea rentables, como ocurre en muchos casos⁴⁵.

Los ASD no sólo ofrecen significativas reducciones del consumo de energía, sino que además la posibilidad de optimizar y controlar más adecuadamente el proceso productivo, reduciendo el tiempo y los materiales requeridos. Muchos procesos y aplicaciones (como las indicadas en el caso de la explotación minera) demandan variaciones de velocidad para ajustar los flujos transportados a los requerimientos del proceso o de suministro de insumos. Tradicionalmente, ello se realizaba mediante estrangulamientos del flujo, lo que es extraordinariamente ineficiente, ya que no sólo reduce la eficiencia del equipo sino que además la potencia demandada no varía en forma significativa, comparada con la que demanda un equipo controlado con ASD⁴⁶.

El desarrollo y difusión de los ASD no se hizo sin problemas, debido a que éstos generaban formas de onda que producían armónicas, causando problemas en la red y aumentando la potencia reactiva, lo que se traducía en pérdidas en los motores. En la actualidad los filtros y otros controles electrónicos han resuelto en parte importante el problema; el Electric Power Research Institute (EPRI) realizó un estudio de caso con motores de 5 HP a 6.300 HP, sin detectar problemas de armónicas importantes⁴⁷.

En el caso del transporte de fluidos, además de introducir motores y equipos eficientes, y los ASD, se pueden obtener mejoras de rendimiento importantes: reduciendo las pérdidas por fricción, reduciendo las fugas

⁴⁵ Los motores eficientes en el rango de hasta 100 HP, presentan rendimientos superiores entre 2 y 6% en relación a los motores estándar. Ello se debe a que los enrollados, las láminas del núcleo, los rodamientos, ventiladores, etc han sido diseñados para reducir las pérdidas y tener menores costos de mantención. El motor eficiente cuesta entre 15 y 25% más que el estándar, por lo que su introducción es rentable cuando: se trata de comprar un tipo u otro, y cuando el motor estándar existente debe ser sometido a una reparación mayor de alto costo.

⁴⁶ La posibilidad de variar la velocidad incide significativamente en los requerimientos de potencia, debido a que la potencia varía con el cubo de la velocidad.

⁴⁷ Felipe Valdés y Edgar Hertwich, op cit

(particularmente en circuitos de aire comprimido), aumentando el diámetro de las tuberías y ajustando la altura de carga.

4.2 Concentración de minerales

En el caso de los minerales sulfurados,⁴⁸ con el fin de separar el cobre de otros minerales y materiales estériles, el mineral es sometido a múltiples etapas de chancado, molienda y harneado, hasta que el mineral alcanza un tamaño del orden de 300 mallas⁴⁹. La concentración del mineral se realiza, normalmente, por flotación para separar el cobre de los elementos no deseados (estéril y otros minerales), obteniéndose concentrados del orden de 30 a 35% de cobre.

El chancado y, sobretodo, la molienda del mineral concentra un elevado porcentaje del total de la electricidad consumida en la minería del cobre, del orden de un 55% de la electricidad total es consumida en esta fase del proceso. Si bien los motores utilizados en la molienda son de alto rendimiento, el proceso de molienda se lleva a cabo con rendimientos energéticos que oscilan entre 2 y 4%, lo que permite esperar significativas mejoras, tras las cuales se desarrollan importantes esfuerzos de investigación a nivel mundial.

A fin de mejorar la eficiencia de esta etapa del proceso, se han introducido equipos que controlan la alimentación de la carga al molino, ASD para el control de las cintas transportadoras que conectan chancadoras y molinos, y controladores lógicos programables (PLC) que mantienen una relativa constancia de la potencia solicitada a los motores de los molinos.

Con el objeto de mejorar la eficiencia en la etapa de flotación se trabaja al nivel de los distintos sistemas de flotación (columnas versus celdas), reagentes, sistemas de agitación, espesadores, plantas de filtrado y el secado del concentrado.

En los minerales oxidados se utiliza la lixiviación ácida (en botadero, en pilas o in situ), lixiviación con agua de mar (proyecto Lince en Chile), lixiviación bacteriana (Sociedad Minera Pudahuel de Chile), y la extracción por solventes (SX) y la electro-obtención (EW).

⁴⁸ A diferencia de los óxidos de cobre, los sulfuros son altamente insolubles en ácido sulfúrico, por lo que la recuperación del cobre se realiza por flotación.

⁴⁹ Del orden de 50 micrones de diámetro.

4.3 Fundición

Esta etapa concentra el consumo de combustibles y genera los mayores impactos ambientales en la minería del cobre. En la División El Teniente de CODELCO-CHILE, la fundición utilizó en 1995 aproximadamente un 77% del total de hidrocarburos consumidos en ella. Es por ello que los esfuerzos se concentran en minimizar los consumos de energía, utilizar los gases de escape de los hornos y cogenerar electricidad, conjuntamente con asignar una elevada prioridad a las acciones destinadas a captar el máximo de las emisiones de SO₂ y arsénico en la fundición.

Los concentrados de sulfuros de cobre, provenientes de la etapa anterior, son sometidos a un proceso pirometalúrgico para separar el cobre del mineral mediante reacciones químicas exotérmicas a alta temperatura. Normalmente los concentrados de cobre son refinados a través de tres etapas en el proceso pirometalúrgico⁵⁰, ellas son: (1) filtrado y secado del concentrado, removiendo parte del dióxido de azufre y el arsénico; (2) la fusión, donde se eliminan las impurezas del mineral, obteniendo un "eje o mata", mezcla de sulfuros de cobre y hierro, que contiene del orden de 45 a 50% de Cu, escoria con un 0,8% de cobre y SO₂; y (3) la conversión, donde el eje es refinado, inyectando aire u oxígeno, obteniendo cobre blister con 99,4% de pureza.

El reemplazo creciente de los hornos de reverbero por Convertidor Modificado El Teniente (CMT) y el horno flash de Outokumpu, tienen por objeto reducir significativamente el consumo de energía y las emisiones contaminantes. En el CMT se aprovecha la energía exotérmica generada por la oxidación del "eje" ⁵¹. En la fundición de Chuquicamata el consumo de fuel-oil pasa de casi 500 kg/ton de ánodo de cobre a poco más de 100 kg/ton de ánodo en el período 1977-93, mientras que el consumo de electricidad pasa de 300 kWh/ton de ánodo a 1.100 kWh/ton de ánodo en el mismo período, reduciéndose significativamente el gasto total en energía

⁵⁰ Los procesos modernos tratan de consolidar estas etapas para reducir las pérdidas de calor debidas a la transferencia del material de una etapa a la otra.

⁵¹ Gerardo Muñoz, "CODELCO-CHILE'S CORPORATE: DECONTAMINATION PLAN FOR ITS SMELTERS", EPD Congress 1996, Edited by Garry W. Warren, The Minerals, Metals & Materials Society, 1995. La introducción de oxígeno en el horno de reverbero (quemadores verticales de oxígeno-fuel-oil directamente a la carga), dobló la capacidad de fusión y redujo los requerimientos de combustibles en más de un 50% y el contenido de SO₂ en los gases pasa de 1,5% a 8%, lo que hace posible alimentar una planta de ácido. El Convertidor Modificado Teniente posibilita reducir aún más los consumos de energía y aumentar la parte del SO₂ en los gases, el metal blanco (75% de cobre) proveniente del CMT alimenta a los convertidores convencionales.

por tonelada de ánodo. En el caso de la fundición Caletones de El Teniente, el costo de energía total pasa de US\$ 100 a US\$ 80/ton de ánodo.

El enriquecimiento del aire con oxígeno en los convertidores, el secado de los concentrados, el aprovechamiento de las reacciones exotérmicas en la etapa de fundición, el aprovechamiento de los gases de fundición en una caldera recuperadora para producción de vapor y/o electricidad, y la recirculación de la escoria a los hornos de reverbero, están destinados a reducir los consumos de combustibles y disminuir las pérdidas de cobre (lo que se traduce también en mejora de la eficiencia energética), en esta etapa del proceso .

4.4 Refinación electrolítica

Los ánodos son enviados a la refinera electrolítica para su refinación final. En esta etapa, se obtienen cátodos con 99,99% de cobre. aún cuando no se dispone de antecedentes respecto de las mejoras posibles y potencialidades alcanzables, cabe señalar que informaciones de refineras extranjeras dan consumos específicos inferiores en un 30 a 35%, respecto de los existentes en las refineras chilenas.

4.5 Procesos hidrometalúrgicos

Los procesos hidrometalúrgicos han experimentado un gran desarrollo con la incorporación de las tecnologías de lixiviación en botaderos, en pilas e in situ para minerales de cobre, estos procesos constan de las etapas básicas siguientes: disolución del cobre por lixiviación, purificación y concentración de la solución por intercambio iónico o extracción por solventes (SX) y obtención del producto final por electroobtención.

La lixiviación se aplica a los minerales oxidados y, con ayuda de bacterias, a minerales sulfurados de baja ley. Puede aplicarse a minerales, relaves o concentrados.

La lixiviación en pilas se aplica a minerales de relativamente alta ley y que han sufrido un tratamiento previo (chancado seguido de aglomeración con agua y ácido sulfúrico, y curado con ácido), mientras que la lixiviación en botaderos se aplica a material estéril de baja ley. Después del pretratamiento, el mineral es curado y regado con ácido sulfúrico.

El proceso de SX permite: purificar las soluciones, concentrar el cobre y preparar una matriz adecuada para la electroobtención. Los extractantes son altamente específicos para el cobre y las impurezas, las que a la

excepción del Fe no son coextraídas. Para prever problemas de impurezas el electrolito es controlado mediante descartes periódicos y etapas de lavado del mismo.

La electroobtención (EW) es similar a la electrorrefinación salvo que se utilizan ánodos insolubles, tiene un consumo claramente superior de electricidad (2000 contra 300 kWh/ton de cobre) y una pureza significativamente mayor a la del método convencional.

El elevado consumo de electricidad en la etapa de electroobtención, ha incentivado el desarrollo tecnológico destinado a reducir los consumos de este energético; algunos de los progresos importantes han sido: la introducción de cátodos de acero inoxidable para depositar el cobre (desarrolladas inicialmente para la electrorrefinación), eliminando las láminas iniciales (parte del proceso original), un menor espaciado ánodo-cátodo, mayor densidad de corriente, equipos de despegue de cátodos, etc.

V. POTENCIALIDADES DE MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA CON QUE SE USA LA ENERGIA EN LA MINERIA

5.1 Balance energético nacional

La minería chilena del cobre consume un 6% del consumo total de energía y un 22% del consumo total del sector industrial y minero del país. En lo que respecta a la electricidad, dichos porcentajes corresponden a 24,5% y 37,9%, respectivamente. La menor importancia relativa del consumo de energía de la minería chilena, cuando se le compara con el consumo total de energía a nivel nacional, se debe entre otras razones a la importancia de los consumos de leña, los que a nivel de los consumos de energía secundaria representan un 17%.

Cabe señalar que de acuerdo a estimaciones recientes, la demanda eléctrica de la minería del cobre crecería a una tasa acumulativa anual superior al 10% para el período 1994-2003⁵², mientras que el consumo total de derivados del petróleo presenta una tendencia al estancamiento, la que no debería modificarse en el futuro, dada la importancia que adquirirá la hidrometalurgia.

El explosivo crecimiento de la demanda eléctrica recomienda realizar los mayores esfuerzos para avanzar en la implementación de decididos programas de uso eficiente de la energía, con un énfasis especial en la electricidad, tanto en lo que respecta a las instalaciones existentes como a los proyectos que se instalarán en los próximos años. En los próximos 5 años la demanda del Sistema Interconectado del Norte Grande crecerá aproximadamente en un 15% promedio anual debido a los nuevos proyectos mineros del cobre.

5.2 Potencialidades técnicas y alcanzables del sector minería

Durante 1992 se realizó un estudio para evaluar las potencialidades técnicas de ahorro de electricidad en el sector industrial y minero, el que estimó dichas potencialidades, en el caso de la minería del cobre, en 30%, siendo las áreas de mayores potencialidades: la refinería electrolítica y la minería subterránea⁵³. El método empleado consistió en comparar el

⁵² PRIEN e IIEC, "Uso eficiente de electricidad en Chile (1994-2020)", informe en elaboración

⁵³ PRIEN, "Potencial de ahorro de energía eléctrica para la industria y la minería", estudio realizado para la Comisión Nacional de Energía, Santiago, Chile, 1993

consumo específico nacional de las principales empresas consumidoras de electricidad (en base a informaciones proporcionadas por las empresas), con los consumos específicos mínimos identificados por la literatura técnica internacional. La diferencia entre ambos valores se adoptó como indicador del potencial técnico de mejoramiento.

Para los casos en que era imposible efectuar comparaciones con consumos específicos internacionales, debido a la especificidad del proceso o de las condiciones de operación, básicamente la explotación minera (minería subterránea o a tajo abierto del cobre), se definió una estructura típica de los usos finales de la electricidad y se consideró el impacto de la introducción de tecnologías de uso general, energéticamente más eficientes.

El análisis no consideró el efecto de la sustitución de fuentes, tales como la intensificación del uso del oxígeno o la introducción de medidas medio ambientales (por ejemplo, reducción de las emisiones de óxidos sulfurados o de partículas, las que se traducen en mayores consumos de electricidad).

Por otra parte, se han realizado estimaciones de las potencialidades alcanzables, las que resultan significativamente menores, debido a que se consideraron tecnologías rentables a la fecha (cuyos rendimientos eran los vigentes a comienzos de los 90's) y tasas de penetración que tienen en cuenta la dificultad de masificar las tecnologías desde la perspectiva actual. Para un horizonte de largo plazo, es probable que lo que hoy es considerado potencial técnico, en unos 25 a 30 años más sea un potencial económico con elevada tasa de penetración.

No hay que olvidar que las tecnologías adoptadas como patrón de referencia -en el caso de la estimación de los potenciales técnicos-, han sido incorporadas en empresas extranjeras por su aporte a la competitividad de las empresas, luego hay implícita una racionalidad económica en su adopción, la que se reforzará con el tiempo en la medida que los equipos que se utilizan en Chile, hayan alcanzado su obsolescencia económica o técnica, y la utilización de las tecnologías eficientes en otros países, se haya masificado suficientemente como para reducir sus costos de inversión, luego no es de extrañar que se obtengan, para la minería del cobre, cifras cercanas o superiores a 20% como ahorros potenciales⁵⁴.

⁵⁴ PRIEN e IIEC, op cit. La estimación realizada en este estudio es claramente inferior a esta cifra (10%); sin embargo, ella fue realizada a partir de criterios excesivamente conservadores y que excluyen las mejoras de procesos que impliquen cambios estructurales para las empresas.

5.3 Algunas experiencias concretas de mejora de la eficiencia energética en la minería del cobre.

Prácticamente la mayoría de los esfuerzos publicados de mejora de eficiencia energética en la minería del cobre chilena corresponden a la empresa estatal CODELCO. A continuación se resumen algunos de los trabajos presentados por sus profesionales en Congresos y Seminarios.

5.3.1 Fusión de concentrados

De acuerdo a un trabajo presentado por profesionales de la División El Teniente en 1990, la incorporación de la tecnología de filtrado a presión (1985), el uso intensivo de oxígeno en los hornos de reverbero (1974), mediante quemadores oxígeno-petróleo, el desarrollo del CMT (1977), la inyección de concentrado seco por las toberas del convertidor (1988) y otras mejoras operacionales permitieron a la División reducir el consumo de energía en la Fundición en un 60% y aumentar la capacidad de fusión de concentrado en 40%⁵⁵.

El filtrado y secado convencional consumen del orden de 30 MJ/ton de concentrados y los filtros a presión del orden de 10 MJ/ton; a la fecha del estudio un tercio de los concentrados era procesado en los filtros a presión. El desarrollo de la tecnología dependerá de la expansión de la producción de concentrados, ya que aunque estos equipos tienen un menor costo, 60% del costo del sistema convencional, ello no es suficiente para justificar el reemplazo de los equipos en uso; por el contrario, su introducción se justifica cuando debe elegirse entre invertir en los equipos convencionales o en los equipos eficientes.

La fusión autógena y en forma de batch en convertidores convencionales, que utilizaban el excedente de calor generado por la oxidación del eje proveniente del horno de reverbero, enriqueciendo el aire de soplado con oxígeno, permitía procesar sobre 60% del concentrado en forma autógena en convertidores, siendo necesario fundir el remanente en un horno de reverbero, para producir el eje necesario para el proceso de conversión.

La utilización de quemadores oxígeno-petróleo, la instalación de los CMT, la alimentación de concentrados secos, el enriquecimiento del aire de combustión con oxígeno, la instalación de una segunda planta de oxígeno y

⁵⁵ Juan Achurra, Julio Buchi y Jaime Guajardo "Optimización energética en las fases de filtración, secado y fusión de concentrado de El Teniente", Departamentos Ingeniería, Desarrollo y Fundición de la División El Teniente de CODELCO-CHILE, Primer Congreso Nacional de Energía, Universidad de Chile, Santiago, abril 1990.

otras mejoras tales como: aumento de la presión de soplado en los convertidores, permitieron lograr las mejoras señaladas previamente. El uso del oxígeno reduce el consumo de los combustibles y aumenta el consumo eléctrico, en los casos en que esta opción ha sido adoptada, el balance económico ha sido claramente positivo.

5.3.2 Comparación de los consumos de energía para la producción de cobre según el proceso convencional y la hidrometalurgia.

Un documento elaborado por un funcionario de la División El Teniente compara ambos procesos, en el entendido que las escalas de producción no permiten sacar conclusiones definitivas, pero son un primer indicador de las potencialidades de la hidrometalurgia y explican, en parte, la importancia creciente de esta tecnología⁵⁶.

El cuadro siguiente resume los consumos de energía, por unidad de cobre fino tratada, en el caso de El Teniente.

⁵⁶ Aldo Almeyda, "Comparación de los procesos tradicional e hidrometalúrgico de obtención de cobre, como consumidores de energía, en CODELCO CHILE, División El Teniente", CODELCO CHILE, División El Teniente, Primer Congreso Nacional de Energía, Universidad de Chile, Santiago, abril 1990.

Comparación de los consumos unitarios por áreas de proceso
(período de análisis, nov. 1988 a oct. 1989)

AREA	PRODUCCION CONSUMO ESPECIFICO
MINA	
Mineral (ton)	32.247.780
Cobre fino (ton)	439.860
kWh/ton mineral ⁵⁷	4,65
kWh/kg Cu fino	0,34
CONCENTRADOR	
Prod. concentrado (ton)	1.003.050
Cobre fino (ton)	346.660
kWh/ton mineral	20,36
kWh/ton concentrado ⁵⁸	654,45
kWh/kg Cu fino	1,89
FUNDICION	
Concentrado fundido (ton)	1.116.030
Cobre fino	363.880
kWh/ton concentrado	1.016,84
kWh/kg Cu fino	3,12
LIXIVIACION	
Solución enviada (m ³)	3.654.845
Cobre fino (ton)	5.267
Wh/m ³ solución	0,61
kWh/ton Cu fino	0,42
EXTRACCION P O R SOLVENTES	
Solución recibida (m ³)	3.654.845
Cobre fino (ton)	5.267
Wh/m ³ solución	0,67
kWh/ton de Cu fino	0,48
ELECTRO-OBTENCION	
Cobre fino producido	5.106
kWh/ton de Cu fino	1,93

En el cuadro siguiente se comparan los consumos totales de energía para ambos procesos.

⁵⁷ Actualmente el consumo específico es de 4 kWh/ton de mineral

⁵⁸ Actualmente el consumo específico es de 682kWh/ton de concentrado

Consumo de energía por ton de cobre fino
(MWh/ton Cu fino)

PROCESOS	CONSUMOS
Mina-Concentrador-Fundición	5,01
Lixiviación-Extracción por solvente-Electrodeposición	2,84

5.3.3 Transporte de minerales

Un trabajo elaborado por profesionales de la División Andina muestra la influencia de la aplicación de convertidores de frecuencia de potencia con tecnología digital en correas transportadoras de gran longitud en faenas mineras. Los nuevos tipos de accionamientos tienen: óptimas características de partida y operación bajo cualquier condición de carga, un menor desgaste de los componentes mecánicos y menores consumos energéticos⁵⁹.

El sistema motriz de las correas ha ido evolucionando a lo largo del tiempo, habiéndose reemplazado recientemente el sistema vigente de 700kW, 3,6 m/s y capacidad de 30.000 TMHD, por otro de 1.260 kW, 5,6 m/s y 50.000 TMHD, con convertidor de frecuencia; lográndose las ventajas siguientes:

- Partida suave y controlada, con aumento continuo de la velocidad desde cero, en un tiempo programable, entre 20 y 600 s.
- Torque de partida constante, dependiente de la carga.
- Velocidad final de operación elegida en cualquier valor dependiendo de la carga.
- Prolongación de la vida útil y de los períodos de mantención de los empalmes y componentes mecánicos.
- Uso de motores de jaula de ardilla, robustos y confiables.
- Convertidores de frecuencia de tecnología digital programables.
- La variación de la velocidad según la carga optimiza el consumo de energía y la conservación de los equipos.

La evaluación de ambas alternativas permitió determinar los consumos de electricidad con velocidad fija y velocidad variable:

⁵⁹ Juan Valenzuela y Alcides Sandoval "Uso de convertidores de frecuencia en correas transportadoras de gran longitud", División Andina, CODELCO CHILE, Primer Congreso Nacional de Energía, Universidad de Chile, Santiago, abril 1990.

- kWh/ton con velocidad fija : 0,462
- kWh/ton con velocidad variable : 0,412,

para un transporte de 12.600.000 TM por año, la energía ahorrada es de 630.000 kWh/año, lo que equivale a un 12% del gasto anual de estas correas.

5.3.4 Optimización de la operación de compresores de aire.

El trabajo presentado resume los resultados de una auditoría de los compresores del nivel Teniente 5 de la mina de esta División, en la que existen ocho unidades de las cuales dos están instaladas desde 1917 (modelo IR, de 927 HP cada uno), cuatro unidades ZR de 850 HP, instaladas entre 1977 y 1984 y dos unidades GD de 500 HP, instaladas en 1989⁶⁰.

Para la evaluación de la situación se midieron directamente los consumos de energía y se obtuvieron indirectamente los caudales de aire entregados por cada compresor, determinándose, para distintas condiciones el rendimiento en cf/kWh.

La comparación de las curvas de rendimiento, permitió detectar que los compresores más antiguos presentaban una caída importante de su rendimiento al aumentar la carga y que con una mantención mayor de los compresores ZR era posible entregar la misma cantidad de aire con sólo cinco compresores, en vez de los ocho que estaban operando.

Este nuevo esquema de operación permitía ahorrar del orden de 29% del consumo anual, lo que correspondía a US\$ 262.460 /año. Informaciones obtenidas con posterioridad a la presentación de este trabajo señalan que el ahorro acumulado entre 1992 y 1995 fue de US\$ 1.800.000.

5.3.5 Control del proceso de molienda de minerales.

Dada la importancia de los consumos de electricidad se analizó la influencia de una serie de parámetros de operación de los molinos de bolsas y barras⁶¹ Las medidas consideradas fueron las siguientes:

⁶⁰ Ernesto Madriaza y Alvaro Ferrá, "Evaluación de eficiencia energética en compresores de aire: una experiencia industrial", División El Teniente, CODELCO CHILE, Segundo Congreso Nacional de Energía, Universidad de Concepción, Concepción, abril 1993.

⁶¹ Edgardo Villagra, " Reducción de costos, mano de obra y energía eléctrica en procesos minero metalúrgicos", División Andina, CODELCO CHILE, Segundo Congreso Nacional de Energía, Universidad de Concepción, Concepción, abril 1993.

- Reducción de la operación en vacío, optimizando el proceso de carga de los molinos.
- Definición de la carga y potencia óptimas
- Introducción de un regulador de tensión en 66 KV (la barra era de 4,16 KV) e inyección de potencia reactiva en el Concentrador, la Mina y los Filtros.
- Introducción de convertidores de frecuencia en las cintas transportadoras
- Reemplazo de motores DC por motores AC con control de velocidad
- Introducción de convertidores de 20% de la potencia en cada subestación, a fin de controlar las armónicas aguas arriba del sistema.

Las recomendaciones permitirían alcanzar ahorros del orden de US\$ 1 millón y un potencial incremento de US\$ 500.000 en los próximos tres años.

5.3.6 Recuperación de los gases en la fundición

Se proyecta instalar una caldera a la salida de la campana captadora de gases de uno de los CMT de Caletones. El objeto es aprovechar la energía térmica de los gases para generar energía eléctrica, disminuyendo la temperatura de los gases que irán a la nueva planta de ácido. La caldera no sólo permitirá generar 6 MW, sino que además suministrar gases preenfriados, más concentrados en SO₂ y secos, aportando parte importante de la electricidad que requiere la nueva planta de ácido⁶².

5.3.7 Optimización de los ventiladores en la mina subterránea

La mina de la División El Teniente cuenta con un sistema de ventilación del tipo aspirante-impelente compuesto de varios subsistemas que sirven las distintas áreas de producción. El sistema cuenta con 22 ventiladores principales, con una potencia instalada de 14.250 HP. Los últimos tres ventiladores instalados de una potencia de 1.200 HP cada uno, disponen de un variador de frecuencia para el conjunto. La ventilación consume alrededor de un 36% de la energía eléctrica total de la Mina (los ventiladores consumen del orden de 53 GWh, lo que corresponde a US\$ 3 millones anuales)⁶³.

⁶² Jorge Godoy y Francisco Urra, "Recuperación energía gases convertidores Teniente", Unidad Planificación Estratégica Fundición y Subgerencia Fundición, División El Teniente, CODELCO CHILE, Tercer Congreso Nacional de Energía, Universidad de La Serena, La Serena, abril 1996.

⁶³ Victor Ramírez, "Estudio de eficiencia energética de los ventiladores principales de la mina subterránea de División El Teniente", Superintendencia Eléctrica, División El Teniente, Tercer

Se analizó el punto de operación actual de los ventiladores y su punto de operación máximo, de ocuparse la potencia nominal del motor, y la influencia de introducir variadores de frecuencia. A partir de estos antecedentes se definieron ciclos de trabajo para los ventiladores que satisficieran los requerimientos de ventilación, incorporando variadores de frecuencia de manera de optimizar el uso de energía.

Igualmente, se analizaron los beneficios de incorporar un variador por ventilador o un variador para un conjunto de ventiladores que trabajan en paralelo. La última opción resultó ser la más ventajosa, ya que los ahorros no justifican la inversión necesaria.

Los distintos ciclos condujeron a ahorros comprendidos entre US\$ 660.000 y 1.300.000, lo que demuestra la conveniencia de estudiar los ciclos de trabajo de los ventiladores para optimizar el funcionamiento del conjunto.