



**ANÁLISIS COMPARATIVO SOBRE EL USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA  
EN LA MINERÍA DE LA APEC.  
BENCHMARKING DE PAÍSES DE LA APEC.**

**Informe Final**

Preparado por

Programa de Estudios e Investigaciones en Energía,  
Instituto de Asuntos Públicos,  
Universidad de Chile

Para

Ministerio de Minería  
Gobierno de Chile.

diciembre de 2004

---

Diagonal Paraguay 265, Torre 15, Piso 13, Santiago, Chile, Tel. (56-2) 678 2386 - 678-2327, Fax (56-2) 678-2006

E-mail: [prien@uchile.cl](mailto:prien@uchile.cl) - <http://www.inap.uchile.cl>

## Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>5</b>
2.1	OBJETIVO GENERAL	5
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
<b>3</b>	<b>CONTENIDOS DEL DOCUMENTO</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>BENCHMARKING EN LA MINERÍA DE APEC</b>	<b>6</b>
4.1	CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS	6
4.2	INTENSIDAD ENERGÉTICA EN LA MINERÍA	7
4.3	MINERÍA EN LAS ECONOMÍAS DE APEC	9
4.3.1	<i>Australia</i>	9
4.3.2	<i>Canadá</i>	9
4.3.3	<i>Chile</i>	9
4.3.4	<i>China</i>	10
4.3.5	<i>Estados Unidos</i>	10
4.3.6	<i>Indonesia</i>	10
4.3.7	<i>Perú</i>	10
4.4	INDICADORES DE CONSUMO DE ENERGÍA EN LA MINERÍA DE APEC.	11
4.4.1	<i>Aluminio</i>	11
4.4.2	<i>Cemento</i>	13
4.4.3	<i>Hierro y Acero</i>	14
4.4.4	<i>Cobre</i>	16
<b>5</b>	<b>PROPUESTA DE ORGANIZACIÓN DEL TALLER.</b>	<b>22</b>
5.1	JUSTIFICACIÓN DEL TALLER	22
5.2	OBJETIVOS QUE SE FIJARON AL TALLER	22
5.3	ESTRUCTURA TEMÁTICA DEL TALLER	23
5.4	LOGÍSTICA	23

<b>6</b>	<b>SÍNTESIS DE LOS RESULTADOS DEL TALLER: “IMPROVING ENERGY EFFICIENCY IN THE APEC MINING INDUSTRY Y PERSPECTIVAS FUTURAS</b>	<b>24</b>
6.1	SESIÓN DE DEBATE Y SÍNTESIS	24
6.2	CONCLUSIONES Y PRINCIPALES LÍNEAS DE ACCIÓN	27
<b>7</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>29</b>
	<b>ANEXO 1: DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS CONSIDERADOS</b>	<b>30</b>
7.1	ALUMINIO	30
7.2	COBRE	31
7.3	CEMENTO	35
7.4	HIERRO Y ACERO	38

# 1 Introducción

Chile juega un rol fundamental en la industria minera de APEC, lo que ha impulsado al Ministerio de Minería a realizar un aporte a la superación de los desafíos de la industria minera mundial, entre los que se encuentran:

- a) Una demanda de productos mineros que crece lentamente y que enfrenta una competencia de sustitutos que se desarrollan con gran dinamismo (fibra óptica, plásticos, nuevos materiales, etc.);
- b) La urgente necesidad de incorporar tecnologías emergentes que apunten a significativas reducciones del costo operativo global,
- c) Presiones ambientales de tipo nacional e internacional (estas últimas vinculadas al cambio climático global) y
- d) Un abastecimiento de energía cuya plena seguridad empieza a ser cuestionada, asociada a costos probablemente más elevados que los actuales.

El uso eficiente de la energía es una opción estratégica para enfrentar dichos desafíos. En efecto, esta opción, no sólo permite mejorar la productividad y competitividad de la industria minera de la APEC, sino también incrementar las ventas de sus productos y reducir la contaminación atmosférica y las emisiones de gases efecto invernadero derivadas de su actividad.

La mejora de la competitividad no sólo está vinculada a la reducción de los costos de producción sino que aporta significativamente al respeto de los compromisos ambientales de los países. En este contexto, se puede señalar que en Chile la refinación del cobre es responsable de parte importante de las emisiones directas e indirectas de gases de efecto invernadero (GEI). El impacto previsto de estos gases obliga tanto a las partes que constituyen el Anexo I (países comprometidos para reducir las emisiones bajo el protocolo de Kyoto) como a los países no incluidos en el Anexo I, mediante mecanismos distintos en este último caso. Mas aún, la eficiencia energética no es solamente la forma más efectiva para mitigar los GEI sino que, en la mayoría de los casos, muy rentable para quien la adopta.

En torno a esta temática, conviene señalar que la APEC, a través de su Grupo Experto en Eficiencia y Conservación Energética (GEMEED), consciente de esta situación, está llevando a cabo iniciativas destinadas a masificar las tecnologías que mejoran la eficiencia energética en el ámbito de la minería. Una de estas iniciativas consiste en la ampliación del conocimiento de la forma en que se usa la energía en la industria minera en las economías que conforman APEC, donde esta actividad económica es particularmente relevante, objetivo que se abordará mediante la consulta a especialistas y, muy especialmente, la realización de un taller APEC sobre Eficiencia Energética en la minería en las economías de APEC. Como resultado del Taller se recogió un conjunto de recomendaciones, derivadas de la experiencia de los países líderes en este tema, destinadas a masificar las tecnologías y prácticas que mejoren la eficiencia en el uso de la energía y contribuyan a reducir los impactos ambientales directos e indirectos del uso de la energía.

En este contexto, el presente documento se centrará en dos objetivos: Realizar un análisis preliminar de indicadores de consumo energético para algunos de los procesos mineros más importantes en las economías pertenecientes a APEC; y en segundo lugar, realizar el diseño conceptual y la organización de un taller de eficiencia energética en la minería de APEC.

Las significativas potencialidades de mejora que existen en la mayoría de las explotaciones mineras y de refinación de minerales deben constituirse en los motores destinados a superar barreras que impiden su concreción, incluso en casos en que las medidas requeridas presentan una elevada rentabilidad para los usuarios, lo que ha obligado a ciertos países o empresas a implementar políticas específicas, las que fueron objeto de los debates que se realizaron en el Taller mencionado y que constituyen un elemento central de las conclusiones y recomendaciones del mismo.

Las propuestas de eficiencia energética tienen en cuenta el contexto económico, político, social o tecnológico donde ellas se implementan, por lo que las experiencias adquiridas en países con una problemática similar son replicables con mayor facilidad que aquellas provenientes de otras culturas y realidades económicas. Lo anterior no supone ignorar que los conceptos básicos son los mismos y algunas de las líneas de trabajo planteadas pueden ser aplicadas a diferentes países.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

El Objetivo General del estudio fue mejorar la información relativa al uso eficiente de la energía en la industria minera de las economías pertenecientes a APEC.

### **2.2 Objetivos específicos**

En la consecución del objetivo general, se realizaron las siguientes actividades

Evaluar la eficiencia energética e indicadores relevantes en la industria minera y su impacto en la reducción de costos, el aumento de la competitividad, la reducción de emisiones y la protección ambiental. Este objetivo se abordó en las presentaciones de los especialistas que intervinieron en el Taller organizado por la Universidad de Chile, con el auspicio de GEMEED, el Ministerio de Minería, CODELCO, ENAP, COCHILCO y COLBUN SA, y que forma parte integral del proyecto.

Compartir información para el mejoramiento de la eficiencia energética en minería en países de APEC, y desarrollos tecnológicos asociados, enfocados a la reducción del consumo energético.

Definir, en la medida de las posibilidades, métodos y sistemas para la reducción del consumo energético en la minería. Se prevé caracterizar en general las medidas, prácticas y enfoques discutidos en el Taller mencionado

Mejorar la información relativa al uso de nuevas tecnologías.

Abrir oportunidades al sector minero y energético público y privado de Chile y países de APEC para conocer y difundir las mejores prácticas tecnológicas y administrativas en cuanto al uso de la energía. Se incluye aquí a la pequeña y mediana empresa.

### **3 Contenidos del documento**

En torno a los indicadores de benchmarking de la industria minera en el APEC, se han establecido los criterios metodológicos para realizar una primera comparación de los consumos de energía. Estos criterios son básicamente dos: la importancia de los consumos de energía en los distintos procesos mineros y, en segundo lugar, la importancia que los procesos mineros más energointensivos tienen en las economías de APEC. Finalmente se comentan algunas cifras relativas a las economías mineras de APEC.

En cuanto al Taller de Eficiencia Energética se incluye una descripción de las actividades realizadas en la organización de éste.

## **4 Benchmarking en la minería de APEC**

### **4.1 Consideraciones metodológicas**

La industria minera a nivel mundial es responsable del uso de una cantidad muy relevante de energía, entre un 4% y un 7% del consumo de energía global. Sin embargo, es importante notar que, dada la falta de estadísticas de consumo de energía, oficiales y detalladas, no es posible cuantificar esa cantidad con la suficiente precisión. Este solo hecho, justifica el estudio de los consumos de energía de esta industria, así como realizar esfuerzos por implementar eficiencia energética en esta industria.

Sin embargo, es necesario tener presente que, al realizar un análisis comparativo de los consumos de energía en la minería, surgen dos grandes dificultades. En primer lugar, no existe información pública que permita caracterizar los consumos de energía de los principales procesos mineros; en segundo lugar y muy ligado a lo anterior, las metodologías aplicadas en la elaboración de los reducidos estudios realizados en este campo son muy distintas. En efecto, existe una heterogeneidad respecto de: las unidades de medida consideradas, los valores de referencia, como por ejemplo el poder calorífico de los combustibles (inferior -PCI- o superior -PCS-), las estimaciones sobre consumos específicos, la definición de los límites de los sistemas, la definición de la actividad minera (referido a extracción) e industria (referido a la refinación), la existencia de explotaciones pluriminerales, o el equivalente térmico de la electricidad, son sólo algunas de las variables que pueden provocar confusión al realizar comparaciones y diferencias significativas al pretender comparar los consumos en una perspectiva de benchmarking.

Para minimizar los problemas de comparabilidad, en este documento se entenderá como industria minera a todo el proceso desde la extracción hasta la refinación de los productos

minerales (es decir, hasta que se encuentren en condiciones de ser utilizados como producto primario final). Por ende, en el caso de los minerales metálicos se considerará como industria minera las etapas de extracción, molienda, fundición y refinación, hasta la producción de cátodos, planchones o lingotes. Se excluyen los procesos de conformado para la elaboración de productos secundarios.

Se ha escogido mantener separados, en la medida de lo posible, el uso de combustibles y la electricidad a pesar de que es factible sumar la energía equivalente (en joules) de cada fuente energética. Esto permite además advertir la electrificación de los procesos mineros si se dispone de series de tiempo para estos indicadores.

Adicionalmente, se debe tener presente que, aún cuando las metodologías de evaluación sean idénticas, las condiciones geológicas, la profundidad del yacimiento, la ley y dureza del mineral, pueden afectar los consumos de energía y por lo tanto, las diferencias en los consumos específicos deben ser interpretadas cuidadosamente.

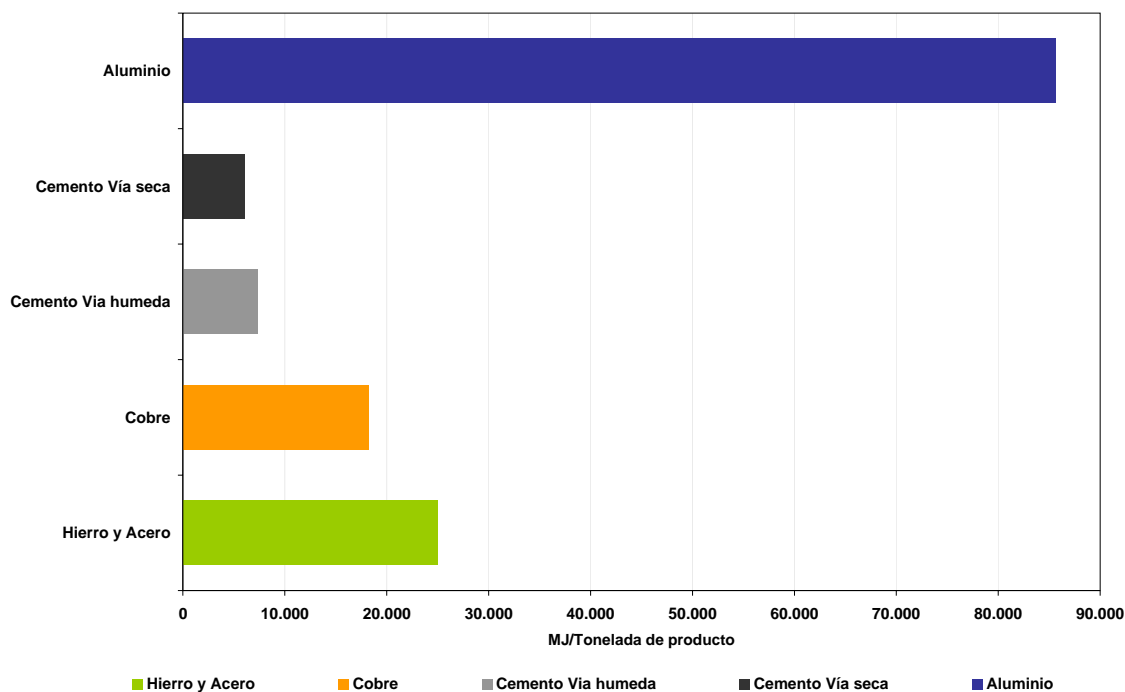
Por otro lado, la gran extensión de procesos mineros, así como la diversidad de economías involucradas hacen necesario el realizar una selección de procesos mineros, en los países seleccionados para el análisis

La selección de los procesos prioriza aquellos que son energo-intensivos. En segundo lugar, los países o economías considerados en el análisis corresponden a aquellos cuyos procesos mineros tienen importancia a nivel mundial.

## **4.2 Intensidad energética en la minería**

Tal como se ha mencionado, la industria minera es responsable importante del consumo mundial de energía, existiendo una gran heterogeneidad respecto de la importancia de los consumos específicos, en función del tipo de mineral y procesos. En el cuadro siguiente se muestran algunos de los procesos mineros más importantes y se comparan sus consumos de energía.

**Gráfico 1: Consumos Específicos de Energía para minerales seleccionados  
(MJ/Tonelada de Producto)**



Los consumos específicos mostrados en la figura anterior agregan la energía eléctrica y la energía de los combustibles sólo a modo de referencia. En estricto rigor, estos consumos deben ser tratados en forma separada debido a los problemas asociados a la equivalencia térmica de la energía eléctrica.

Por otra parte, dichos procesos no sólo presentan elevados consumos específicos sino que además el producto final de ellos tiene una significativa demanda a nivel mundial, como se muestra en el cuadro siguiente:

**Cuadro 1: Producción física y valor de la producción para productos seleccionados**

Producto	Producción Mundial 2000 Miles de Toneladas Métricas	Valor billones de USD
Cemento	1.650.000	110
Acero	616.000	212
Aluminio	24.400	35
Cobre	13.200	27
Oro	2,59	29

Fuente: Elaboración propia en base a USGS.

Considerando los niveles de producción y sus intensidades energéticas, el cemento, acero, aluminio y cobre son responsables de la mayor parte del consumo de energía de la industria minera mundial.



## **4.3 Minería en las economías de APEC**

### **4.3.1 Australia**

Australia es considerado, a nivel mundial, el tercer productor de commodities en el mundo. De hecho el crecimiento económico de Australia se encuentra estrechamente relacionado con el comportamiento de este sector de la economía, contribuyendo con alrededor del 4.6% del PIB australiano. Australia es el principal productor de bauxita, diamantes, y circón y es un importante productor de carbón, hierro, oro, uranio, zinc, plomo, plata y cobre.

Sólo una pequeña proporción de los minerales explotados son refinados en el país y el resto es exportado en forma de semi elaborados. La industria minera aporta cerca del 60% de los ingresos por exportaciones.

Debido a su tamaño y geología única, el potencial minero de Australia es muy relevante . Sin embargo, debido a restricciones locales, se han incrementado los fondos de exploración invertidos en otros países.

### **4.3.2 Canadá**

Canadá es otro de los líderes mundiales en minería, siendo uno de los mayores productores y exportadores de commodities, tales como: oro, níquel, cobre, zinc, plomo, hierro y recientemente diamantes. La industria minera canadiense (incluyendo fundición y refinación contribuye con cerca del 4% de PIB.

Mientras las reservas de oro se han más que triplicado en los últimos 20 años, las reservas metálicas canadienses han caído dramáticamente durante el mismo período.

Las alzas en los precios del níquel han provocado intensos esfuerzos de exploración en torno a los depósitos de Níquel-Cobre en Ontario. Sin embargo, el desarrollo de nuevos depósitos en esta área requerirá enfrentar importantes barreras de orden ambiental y legal.

### **4.3.3 Chile.**

Chile es uno de los países latinoamericanos más importantes en el área minera y es el primer productor mundial de cobre. La minería ha sido fundamental en el mantenimiento de una economía sólida, representando cerca del 8% del PIB nacional, siendo además casi la mitad de los ingresos por exportaciones del país. El 80% de ese total se concentra en las exportaciones de cobre. Las inversiones en el sector minero han crecido significativamente en los últimos años, alcanzando cerca de USD 2.000 millones en 2001.

Las grandes extensiones de minerales de cobre y molibdeno que existen en la Cordillera de los Andes son responsables de que Chile posea grandes reservas de estos minerales. Además de cobre, Chile es también uno importante productor de oro y plata. Durante los últimos 30 años se han descubierto 22 vetas de cobre y 13 vetas de oro, como resultado las reservas de Chile se estiman en 125 millones de ton de cobre metálico, 1.800 ton de oro y 12.100 ton de plata.

#### **4.3.4 China**

China es uno de los principales actores en el mercado de los commodities. La industria minera china es tercera a nivel mundial, sin embargo las estadísticas son escasas, la mayor parte de la producción de China es consumida localmente por compañías estatales. El país tiene alrededor del 80.000 empresas mineras estatales y 200.000 minas.

Con los años, China ha establecido una industria minera que abarca la totalidad de las actividades de este sector: geología, explotación, refinación, desarrollo científico, diseño y manufactura de equipos, administración, educación y entrenamiento.

Muchas de las operaciones mineras chinas se acercan al límite de las reservas, lo que ha provocado la necesidad de localizar y desarrollar nuevos proyectos. Esto se suma a la apertura de algunos sectores de la economía china a las inversiones extranjeras, lo que hace de China un país con altas perspectivas en este campo.

#### **4.3.5 Estados Unidos**

Estados Unidos de Norteamérica es el líder mundial en cuanto a la industria minera, produciendo una amplia variedad de commodities y minerales. Es uno de los principales productores de oro, cobre, plata, plomo, zinc, molibdeno, y carbón. Produce además la mayoría de los metales con la excepción de manganeso y titanio.

Las agencias ambientales estadounidenses han aumentado las presiones sobre las compañías mineras y de exploración, las que han sido responsabilizadas de una parte significativa de las emisiones contaminantes al agua como a la atmósfera. Como resultado, las futuras exploraciones y desarrollos mineros deben cumplir con una serie de requisitos previos. La carga financiera adicional que esto implica ha reducido la cantidad de proyectos mineros.

#### **4.3.6 Indonesia**

Indonesia es uno de los mayores productores de estaño, de carbón y de cobre. Además produce cantidades significativas de oro y níquel. Las exportaciones de minerales y productos relacionados representan cerca del 20% del total de las exportaciones de Indonesia siendo el oro el que representa la mayor parte de los ingresos. Indonesia es también productor de bauxita y hierro.

#### **4.3.7 Perú**

La industria minera de Perú contribuye significativamente al producto nacional (entre el 6% y 7% del PIB). Es un importante productor de oro, (el mayor de Latinoamérica), plata, estaño, cobre, plomo, y zinc. El año 2003 el valor de la producción minera de Perú creció en un 21% hasta los USD 5.600 millones debido al aumento de la producción de la casi totalidad de sus minerales. En conjunto con las exportaciones de petróleo, las exportaciones de minerales alcanzaron cerca del 60% del valor total de las exportaciones peruanas.

La producción de minerales en Perú se basa en el crecimiento de la minería del oro y de los proyectos de hidrometalurgia en el caso del cobre. Se espera que desarrollo de proyectos mineros de cobre-zinc eleve en un 1,5% el aporte de la minería al PIB.

El siguiente cuadro presenta las estadísticas de producción de las economías de APEC en el año 2002, para aquellos productos en que éstas se encuentran entre los 10 principales productores mundiales:

**Cuadro 2: Producción 2002, Países APEC y productos seleccionados.**

País APEC	Aluminio		Cemento		Cobre		Mineral de Hierro		Hierro reducido	
	Miles de Tons.	Rank	Miles de Tons.	Rank	Miles de Tons.	Rank	Miles de Tons.	Rank	Miles de Tons.	Rank
Australia	1.836	5	7.550	-	883	4	113.548	2	7.300	-
Canadá	2.709	3	13.200	-	600	7	20.750	9	9.720	-
Chile	0	-	3.600	-	4.581	1	5.515	-	964	-
China	4.300	1	704.720	1	585	8	76.200	3	170.750	1
Corea	0	-	55.514	5	0	-	110	-	26.500	9
Estados Unidos	2.707	4	91.266	3	1.140	3	32.499	6	40.670	4
Indonesia	160	-	33.000	10	1.160	2	261	-	1.500	-
Japón	7	-	71.800	4	1	-	0	-	80.979	2
Perú	0	-	4.000	-	843	5	3.093	-	410	-

#### 4.4 Indicadores de consumo de energía en la Minería de APEC.

El siguiente ejercicio es una compilación de algunas experiencias nacionales e internacionales en la evaluación de los consumos de energía en la Minería de APEC a través de distintos indicadores.

En el anexo 1 se presenta una breve descripción de los procesos de producción del aluminio, cobre, hierro y acero, y cemento, estos procesos son analizados a continuación en función de sus consumos de energía a nivel internacional.

##### 4.4.1 Aluminio

Los requerimientos de energía para la producción de aluminio se desglosaron en las etapas de mina o extracción de bauxita; refinación de alúmina, y refinación electrolítica, se entregan datos adicionales para los consumos de energía necesarios para la producción de los ánodos utilizados en la reducción de la alúmina.

En la etapa de mina, los consumos de energía son pequeños en comparación con los procesos de extracción de otros minerales debido a que, tal como se menciona en la descripción del proceso (Anexo 1), la bauxita no requiere de procesamientos complejos. En el caso de Australia se reportan<sup>1</sup> consumos específicos medios de 45 MJ/ton de bauxita extraída, con variaciones de  $\pm 50\%$ , sin embargo, pueden existir incluso mayores variaciones, dependiendo de las condiciones de las minas, que por lo general son de superficie pero existen también minas subterráneas. Cerca del 50% de los consumos se deben al transporte de la bauxita. Con respecto al tipo de energía consumida cerca del 99% corresponde a combustibles fósiles.

<sup>1</sup> Energy efficiency best practice in the Australian aluminium industry, summary report, Industry, Science and Resources Energy Efficiency Best Practice Program, July 2000

En la etapa de refinación de alúmina los mayores consumos están en la etapa de calcinación del proceso Bayer. En Australia se informa un consumo medio de 11.000 MJ por ton de alúmina con un rango de 30% entre los valores extremos. Este es uno de los más bajos consumos específicos que registra la literatura internacional, por lo general, los consumos de la industria son del orden de 13.500 MJ/ton de alúmina. Los potenciales de mejora propuestos por la literatura hablan de que los consumos podrían llegar hasta los 9.458 MJ por ton de alúmina.

La refinación electrolítica es el proceso más energo-intensivo en la industria del aluminio. El proceso de refinación Hall-Heroult es intensivo en energía eléctrica, siendo el promedio mundial del orden de 15.364 kWh/ton de aluminio con consumos que varían entre los 14.000 y los 18.000 kWh/ton de aluminio<sup>2</sup>. En Australia, el consumo eléctrico en la refinería es de alrededor de 14.400 kWh/ton de aluminio, lo que es consistente con las especificaciones de rendimiento de las celdas Hall Heroult modernas. En Canadá dichos consumos específicos corresponden unos 16.400 kWh/ton de aluminio.

En definitiva, el cuadro siguiente resume la información proporcionada por la literatura internacional. Se ha intentado en la medida de lo posible separar los consumos eléctricos de los de combustibles de modo de evitar los problemas de conversión del equivalente térmico de la energía eléctrica. Se entregan también los datos encontrados en la literatura de los consumos totales (combustibles más electricidad).

**Cuadro 3: Indicadores de consumo de energía para la industria del aluminio**

Proceso/Etapa	Producto	Unidad de Producción	Consumos específicos de E. Eléctrica	Consumos específicos de Combustibles	Consumos específicos Totales	Obs.
			kWh/Unidad de Producto	MJ/Unidad de Producto	MJ/Unidad de Producto	
Aluminio	Aluminio	ton	15.700 (1)	6.300 (5)	66.000 (5)	a
			16.700 (5)			
Mina	Bauxita	ton	0,4(1)	227(1)	45 (2)	
Refinación de Alúmina	Alúmina	ton	109 (1)	13.160 (1)	11.000 (2)	a, b
Producción de ánodos	Ánodos	ton	266	3.938 (1)	4.880 (1)	
Refinación Electrolítica	Aluminio	ton	15.400 (1)	653 (1)	25.500 (3)	a
			14.000-18.000(4)			

**Observaciones y Notas**

En paréntesis la fuente de información

a. Consumos específicos basados en datos obtenidos de "Life Cycle Inventory Report for the North American Aluminum Industry" published by the Aluminum Association in Nov. 1998.

b. Combustibles consideran: Fuel Oil, Diesel, Kerosene, Gasolina, Gas Natural, Carbón, Coke, y Propano

**Fuentes**

1. U.S. Energy Requirements for Aluminum Production Historical Perspective, Theoretical Limits and New Opportunities, January 2003
2. Energy efficiency best practice in the Australian aluminium industry, summary report, Industry, Science and Resources Energy Efficiency Best Practice Program, July 2000
3. Reportado en "Survey of factors influencing demand for metals and energy", Project N° EWG 07/2001T, Agosto, 2002

<sup>2</sup> EP Indicator & Benchmark Shortlist Document, REMAS, 2003

4. EP Indicator & Benchmark Shortlist Document, REMAS, 2003
5. John Nyboer Jian Jun Tu, A Review of Energy Consumption and Related Data Canadian Aluminium Industries 1990 to 2001, Canadian Industry Energy End-use Data and Analysis Centre Simon Fraser University November, 2003

#### **4.4.2 Cemento**

##### **Extracción y molienda de la caliza**

Las materias primas más comunes para la producción de cemento son: caliza y arcillas. La mayoría de las extracciones se dan en una cantera adyacente o muy cerca de la planta, normalmente explotando canteras abiertas, lo que no excluye la minería subterránea.

En estas operaciones el energético principal es la electricidad, por lo que los indicadores se dan normalmente en kWh/ton de mineral o de cemento, siendo los consumos habituales del orden de 20 kWh/ton de materia prima, siendo mayor el consumo en molienda en el caso del proceso seco

##### **Producción de clinker**

La producción del clinker concentra parte importante de la energía utilizada para la producción del cemento, parte fundamental de esa energía corresponde a energía térmica destinada a la calcinación de la caliza. Los consumos específicos de energía varían significativamente si se trata de proceso seco, proceso húmedo o variedades intermedias (semi-seco o semi-húmedo) de dichos procesos base. Es así como, el proceso seco con multi-etapas de precalentado y precalcinado consume del orden de 3.000 kJ/ton de clinker y en el proceso húmedo del orden de 6.000 kJ/ton de clinker

Una vez formado el clinker, éste debe ser enfriado rápidamente. Las principales tecnologías usadas en el enfriamiento son: el refrigerador de rejilla, el de tubo o planetario. Los consumos de energía asociados al proceso de refrigeración varían entre 9 y 12 kWh por tonelada de clinker.

##### **Molienda de cemento**

Una vez enfriado el clinker se almacena en silos. Para producir cemento en polvo, los nódulos de clinker son molidos. Este último proceso se realiza en molinos de bolas, de rodillo, en prensas de rodillo, o en combinación de estos equipos. En el proceso de molienda del clinker se agregan aditivos (5% a 35%) en función de las propiedades del cemento requerido. El consumo de energía para moler depende de la consistencia requerida para el producto final y de los aditivos agregados. A modo de ejemplo, los consumos de energía en molinos modernos de bolas se encuentran entre 32 y 37 kWh por tonelada.

En el cuadro siguiente se incluyen consumos específicos para las principales etapas, clasificados según 3 tipos de referencias: consumos reales de plantas internacionales, mejores prácticas y los indicadores de benchmarking (definidos por el rango superior de las principales tecnologías

**Cuadro 4: Indicadores de consumo de energía para la industria del cemento**

Procesos	Preparación materia prima (kWh/ton MP)	Clinker (kJ/kg clinker)	Molienda final (kWh/ton cemento)
Plantas referencia	17-21	2930-3100 seco 6.000 húmedo	22,8-41,8
Publicaciones técnicas	10-20	2900-3200 seco	24,5-36,5
Mejor rendimiento	10	2977	42

Fuente: Michael Ruth, Ernst Worrell & Lynn Price; Evaluating clean development mechanism projects in the cement industry using a process-step benchmarking approach, Lawrence Berkeley National Laboratory, July 2000

Notas:

- a) Las plantas de referencia corresponden a Tailandia, Alemania, India y México
- b) Las publicaciones técnicas se refieren a tecnologías específicas
- c) Los mejores rendimientos se seleccionaron como los menores consumos específicos de las “mejores prácticas”

Conviene señalar que algunos de los consumos están influenciados por las escalas de producción de los ejemplos seleccionados, el proceso húmedo o seco, el número de etapas del precalentador y precalcificador, la resistencia del cemento, el tipo de molino o de prensa de trituración. En cuanto al consumo de energía total también hay fuertes diferencias en función de la relación clinker/cemento.

Valores de consumo superiores a los indicados muestra el estudio de Ernst Worrell and Christina Galitsky<sup>3</sup> orientado a evaluar las potencialidades de mejora de la eficiencia energética en la industria del cemento en los Estados Unidos, donde todavía existe un 25% de plantas que operan con el proceso de vía húmeda.

A su vez el Energy Conservation Center de Japón informa, para plantas integradas un consumo 4,5% al mejor consumo indicado en la tabla anterior

#### **4.4.3 Hierro y Acero**

Los dos principales procesos de producción de hierro son el que utiliza el horno de oxígeno básico (HOB) y el que utiliza el horno de arco eléctrico (HAE) ambos procesos se encuentran descritos brevemente en el anexo 1.

---

<sup>3</sup> Ernst Worrell and Christina Galitsky, January 2004 “Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers”, Environmental Energy Technologies Division Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory

El proceso de extracción del mineral presenta, en el caso de Canadá<sup>4</sup> valores de consumo de energía que a nivel nacional han variado entre los 460 y 380 MJ/ton de mineral de 1990 a 1999, en el caso chileno, los valores de consumo específico, que incluyen la pelletización del mineral extraído de la mina, alcanzan los 1.100 MJ/ton de pellets. En el caso europeo<sup>5</sup> se registran valores de consumo de energía de entre 1.231 y 1.420 MJ/ton de pellets sólo para el proceso de pelletización.

En la producción de coke, necesario para la reducción de los óxidos de hierro, se registran<sup>5</sup> en EEUU consumos medios de 3.530 MJ/ton de coke, en Europa dichos consumos se encuentran en un rango comprendido entre 3.200 y 3.900 MJ/ton de coke asociado a combustibles y de 20 -170 MJ/ton de coke para el consumo eléctrico.

Las mayores diferencias se encuentran al observar los consumos que demanda la producción de arrabio en el alto horno. En efecto, mientras en EEUU se registran consumos de 11.320 MJ/ton de hierro, en Europa éstos van de 1.190 a 3.470 MJ/ton de arrabio<sup>6</sup> para combustibles, y entre 270 y 370 MJ/ton de arrabio para el consumo de electricidad. La gran diferencia debe estar asociada a que una cantidad significativa de coke y carbón son registradas como insumos para el proceso reductor, lo que no implica un uso como energético.

Finalmente, en el HOB los consumos de energía son significativamente menores, en Europa ellos oscilan entre 20-55 MJ/ton de acero crudo para los combustibles y entre 38 y 120 MJ/ton de acero crudo para la electricidad. Por su parte, en el caso de EEUU se registran consumos específicos totales de 800 MJ/ton acero para 1998.

El proceso alternativo de producción de acero mediante el horno de arco eléctrico tiene asociado consumos medios que en el caso de APEC se encuentran alrededor de los 5.450MJ/ton de acero<sup>7</sup>. Mientras que es los EEUU los consumos son de 5.540 MJ/ton de acero.

---

<sup>4</sup> "Survey of factors influencing demand for metals and energy", Project N° EWG 07/2001T, Agosto, 2002

<sup>5</sup> European Commission, Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Best Available Techniques Reference Document on the, Production of Iron and Steel December 2001

<sup>6</sup> Calculado en función de los valores reportados para cada uno de los energéticos utilizados en la etapa

<sup>7</sup> De Asia Pacific Energy Research Centre (APEREC), 2001, "Energy Efficiency Indicators A Study Of Energy Efficiency Indicators For Industry In APEC Economies"

Cuadro 5: Indicadores de consumo de energía para la industria del hierro y el acero

Proceso/Etapa	Producto	Unidad de Producción	Consumos específicos de E. Eléctrica	Consumos específicos de Combustibles	Consumos específicos Totales	Obs.
			kWh/Unidad de Producto	MJ/Unidad de Producto	MJ/Unidad de Producto	
Acero y Hierro						
Extracción	pellets	ton			1.100	
Alto horno	arrabio	ton	75-102,8 (2)	1.190-3.470 (2)	11.320 (1)	
Horno de coque	coke	ton	5,6-47,2	3.200-3.900 (2)	3.530 (1)	a
HOB	Acero crudo	ton	10,6-33,3 (2)	20-55 (2)	800 (1)	
HAE	Acero crudo	ton			5.450 (3) 5540 (1)	

Obs.

a. valores originales para consumo específico de energía eléctrica en MJ/ton, transformados usando la equivalencia 3,6 MJ/kWh

1. "Survey of factors influencing demand for metals and energy", Project N° EWG 07/2001T, Agosto, 2002

2. European Commission, Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Best Available Techniques Reference Document on the, Production of Iron and Steel December 2001

3. De Asia Pacific Energy Research Centre (APEREC), 2001, "Energy Efficiency Indicators A Study Of Energy Efficiency Indicators For Industry In APEC Economies".

#### 4.4.4 Cobre

##### Consumo unitario mina rajo abierto.

Los principales factores que inciden en el consumo de energía en las faenas mineras realizadas a tajo abierto tienen relación con:

- La razón lastre/mineral útil.
- Las distancias medias de acarreo.
- La geometría del yacimiento.
- La dureza de la roca.
- Los equipos empleados para el transporte de mineral y lastre (correas de transporte, retroexcavadoras, camiones)

En los últimos 5 años, al menos en Chile, se ha medido una disminución tanto del consumo unitario de combustibles (alrededor de un 16%) como de electricidad (alrededor de un 40%).

##### Consumo unitario mina subterránea.

La mina subterránea, en relación a la mina a tajo abierta, tiene los siguientes factores que la diferencian desde el punto de vista energético:



- a) Las distancias de acarreo son inferiores, lo que se traduce en un menor consumo unitario de combustibles.
- b) Las leyes de mineral son superiores, lo que hace disminuir el consumo energético.
- c) La geometría del yacimiento es un factor muy incidente al comparar un mineral con otro.
- d) En la minería subterránea se emplea electricidad en forma intensiva en sus sistemas de ventilación y aire comprimido.
- e) En casos en que la mina se encuentre en lugares muy fríos es necesario calentar el aire de ventilación, lo que implica un consumo de energía importante.
- f) En casi todos los casos, se incorpora a los consumos de la mina subterránea, etapas de prechancado de mineral de modo de facilitar su transporte.

En general, a nivel mundial, se observan fluctuaciones crecientes en el consumo unitario de energía en minas subterráneas. En Chile, en un quinquenio la energía eléctrica por unidad de mineral extraído se ha incrementado en un 16%. En el mismo período el consumo de combustibles se ha incrementado en un 28%.

### **Consumo unitario de la concentradora de cobre.**

Las plantas concentradoras de cobre tienen un bajo consumo unitario de combustible. Incluso este consumo ha tendido a disminuir, debido a la sustitución paulatina de secadores rotatorios térmicos por filtros de alta eficiencia, en base a electricidad.

Por el contrario, la concentradora es la etapa de mayor consumo unitario de electricidad en el procesamiento del cobre. Esta energía se utiliza fundamentalmente en el proceso de chancado y molienda. El orden de magnitud de este consumo es muy alto, 19,0 kWh/ton de mineral (587,2 kWh/ton de concentrado; 1706,5 kWh/ton de fino). En general, los valores han sido bastante estables en el último quinquenio, en el que se observa un incremento de un 10% del consumo unitario de electricidad, a pesar de los fuertes cambios tecnológicos. Los cambios tecnológicos han estado fundamentalmente asociados a la molienda semiautógena y a las grandes celdas de flotación. El cuadro siguiente muestra el análisis comparativo de los indicadores de tres equipos de molienda empleados para procesar un mismo tipo de mineral de cobre:

- Full autógeno: Molino SAG, 1 chancador y un molino de bolas.
- Semiautógeno con 4 a 5% de nivel de llenado de bolas (de 5") con el mismo equipo y finalmente
- Semiautógeno con 10.5% de nivel de llenado de bolas y más un segundo molino de bolas.

Se observa claramente que el último esquema es mejor tanto en cuanto a consumo específico de energía como en nivel de producción. Lo anterior revela la importancia que tiene el manejo adecuado de las plantas de molienda, usando la energía y la producción como parámetro indicador. Mediante estos indicadores se pueden ahorrar grandes cantidades de energía incrementando incluso los niveles de producción.

Cuadro 6: Indicadores de consumo de energía para la equipos de molienda de cobre

MOLIENDA DE COBRE	POTENCIA (KW)		ENERGÍA (KWH/TMS)		PRODUCCIÓN
	SAG	BOLAS	SAG	BOLAS	TMS/HR
AUTÓGENO	7095	3810	19.0	10.3	381
SEMIAUTÓGENO 4%	8474	4204	12.3	6.0	700
SEMIAUTÓGENO 10.5%	10621	4232	8.9	7.4	1193

#### Consumo unitario de la fundición de cobre.

En el último tiempo, y por razones ambientales, las fundiciones de cobre incorporan plantas de ácido sulfúrico. El consumo unitario de combustible es bastante alto: entre 2200 MJ/ton de concentrado fundido (7.100 MJ/ton de Blister). Este consumo unitario, en Chile, ha mostrado una disminución de un 14% en el quinquenio 1995-2000.

Desde el punto de vista de la energía eléctrica, su uso ha sido creciente debido a la incorporación del uso de oxígeno en el Horno Flash y en el Convertidor Teniente.

El cuadro siguiente compara los requerimientos de energía para siete tipos de equipos de fundición, incluyendo los equivalentes de energía de los materiales consumidos en cada proceso.

Los hornos flash son los más eficientes en el uso de la energía térmica liberada durante la oxidación de los sulfuros, este último proceso genera la mayor parte del calor requerido para calentar y fundir la carga.

**Cuadro 7: Requerimientos energéticos de procesos pirometalúrgicos (GJ/ton)**

	Convertidor Teniente	Carga seca al horno de reverbero	Horno Eléctrico	INCO flash	Outokumpu flash	Reactor Noranda	Reactor Mitsubishi
<b>Manejo de Materiales</b>	0.70	0.77		0.77	0.60	0.83	0.70
Seco o Tostado	0.85	0.70	2.82	1.86	1.23	0.80	1.29
<b>Fundición</b>							
Petróleo	4.25	14.50			0.08	3.72	6.46
Electricidad	0.64	0.64	19.03	0.05		1.26	1.58
Excedentes de vapor		-4.35			-3.43	-1.82	-8.00
<b>Convertidor</b>							
Electricidad	0.40	1.26	2.92	0.94	0.64	0.37	1.42
Petróleo	0.54	0.32	3.58	0.09	0.25		
Limpieza de escorias	1.10				1.49	1.31	1.35
<b>Manejo de gases</b>							
Gas caliente	0.80	2.83	0.78	0.59	0.42	0.69	0.86
Gas frío		0.40	2.21	0.31	0.21		0.32
Emisiones fugitivas	3.50	3.57		3.57	3.57	3.57	0.89
Planta de ácidos	3.20	3.87	4.74	3.19	3.86	3.10	4.08
Agua	0.10	0.10		0.10		0.10	0.10
<b>Electrorefinación</b>	5.82	5.82	5.10	5.82	5.82	5.82	5.82
<b>Materiales:</b>							
Misceláneo					0.04	0.65	0.63
Oxígeno				3.53	3.04	3.17	1.29
Electrodos			0.86				0.16
Flujos	0.04	0.03	0.12	0.02	0.01	0.02	0.06
Agua	0.08	0.08		0.08	0.08		0.08
Horno de ánodos	0.47	0.47	0.51	0.47	0.47	0.47	0.47
<b>Total</b>	<b>22.49</b>	<b>30.93</b>	<b>42.52</b>	<b>21.26</b>	<b>18.92</b>	<b>24.01</b>	<b>19.77</b>

### Consumo unitario de la refinación electrolítica.

El consumo de combustible en el refinado electrolítico no es relevante, a pesar que se le requiere para mantener constante la temperatura del electrolito. Por el contrario el refinado electrolítico (cátodos ER) es muy intensivo en el empleo de electricidad: del orden de 301,9 kWh/ton de cátodos ER (1087 MJ/ton de cátodos ER). Este consumo unitario ha permanecido prácticamente constante en los últimos años, a pesar de que existen algunos cambios tecnológicos tales como la incorporación de la electrónica de potencia y de cátodos y ánodos de diferente calidad.

### Consumo unitario de la electroobtención de cobre.

Los minerales oxidados, luego de ser acumulados en pilas, donde se maneja y se hace circular una solución ácida que finalmente se enriquece con el cobre del mineral, pasa al proceso de electroobtención (EO) que es un fuerte consumidor de electricidad: 21.274 kWh/ton mineral (2.804 kWh/ton de cátodo EO, 10.096 MJ/ton de cátodo EO). Esta cifra ha mostrado durante el último quinquenio una ligera disminución de alrededor de un 7%.

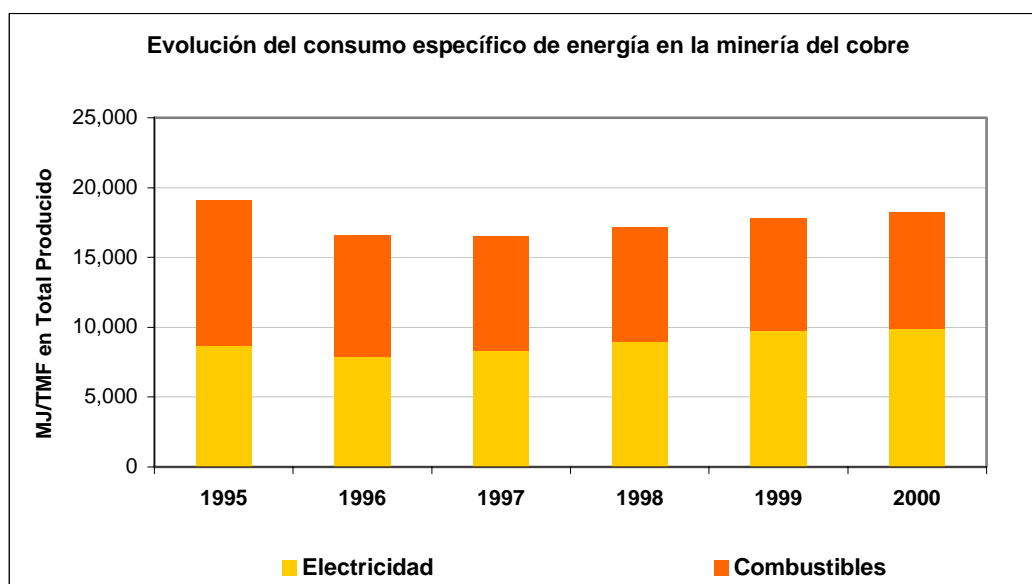
## Consumo unitario global de energía de la minería del cobre.

Dado que los métodos empleados de explotación y procesamiento del cobre son radicalmente diferentes, tiene poco sentido hablar de un consumo unitario de energía por unidad de cobre fino producido que tenga validez mundial. Ello dependerá si las minas son o no subterráneas, si existe fundición o no, si se emplea electroobtención o electrorrefinación, etc. En el caso chileno, por ejemplo, en el quinquenio 1995-2000, el consumo de energía eléctrica por tonelada de cobre fino, luego de experimentar un descenso de un 8,8% entre 1996 y 1995, muestra un incremento de un 8,3% entre 1998 y 1999. El cuadro siguiente muestra los consumos unitarios de energía y el nivel de producción en cada año.

Cuadro 8: Indicadores de consumo de energía para la minería del cobre

Ítem	Unidad	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Energía eléctrica	MJ/TMF	8,680	7,914	8,343	8,991	9,742	9,870
Combustibles	MJ/TMF	10,450	8,684	8,181	8,195	8,063	8,355
Total energía	MJ/TMF	19,131	16,598	16,524	17,186	17,804	18,226
Producción	kTMF	2,489	3,116	3,392	3,687	4,391	4,602

Gráficamente, y a pesar que los procesos son radicalmente diferentes en cada explotación minera, y que el incremento de la producción de cobre en el período ha sido sustantiva, no se observa una gran variabilidad en el consumo específico de energía.



Los cuadros siguientes resumen los consumos unitarios de energía en el caso chileno.

Cuadro 9: Indicadores de consumo de energía eléctrica para el caso chileno

<b>Energía eléctrica</b>			
<b>Área</b>	<b>Unidad</b>		<b>Año 2000</b>
Mina rajo abierto	MJ/TMF	en mineral	452.3
Mina subterránea	MJ/TMF	en mineral	1195.2
Concentradora	MJ/TMF	en concentrados	6143.5
Fundición	MJ/TMF	en Blister	3464
Refinería	MJ/TMF	en cátodos ER	1241
Tratamiento de óxidos	MJ/TMF	en cátodos EO	10096.2
Servicios	MJ/TMF	total producido	476

Cuadro 10: Indicadores de consumo de combustibles para el caso chileno

<b>Combustibles</b>			
<b>Área</b>	<b>Unidad</b>		<b>Año 2000</b>
Mina rajo abierto	MJ/TMF	En mineral	3984.5
Mina subterránea	MJ/TMF	En mineral	753.3
Concentradora	MJ/TMF	En concentrados	191.6
Fundición	MJ/TMF	En Blister	7773
Refinería	MJ/TMF	En cátodos ER	1011.4
Tratamiento de óxidos	MJ/TMF	En cátodos EO	3596.9
Servicios	MJ/TMF	Total producido	427

## **5 Propuesta de organización del taller.**

### **5.1 Justificación del Taller**

Dado que las economías de APEC juegan un rol fundamental en la industria minera mundial, el Grupo Experto en Exploración y Desarrollo de Minerales y Energía, GEMEED advirtió la necesidad de superar desafíos de envergadura para la industria tales como:

- a) Una demanda de productos mineros que enfrenta una competencia de sustitutos que se desarrollan con gran dinamismo (fibra óptica, plásticos, nuevos materiales)
- b) La urgente necesidad de incorporar tecnologías emergentes que apunten a significativas reducciones del costo operativo;
- c) Presiones ambientales de tipo nacional e internacional (estas últimas vinculadas al cambio climático global); y
- d) Un abastecimiento de energía cuya plena seguridad empieza a ser cuestionada, asociada a costos probablemente más elevados que los actuales. Conviene señalar que la minería consume un porcentaje significativo del total de la energía utilizada a nivel mundial. En el caso chileno la minería consume aproximadamente un tercio de la electricidad demandada por el país.

Existe consenso en señalar que el uso eficiente de la energía es una opción estratégica para enfrentar dichos desafíos. De esta manera, un Taller de Eficiencia Energética como el realizado permitió iniciar un proceso de acercamiento de las economías de APEC en pos de unir esfuerzos, apoyándose en la eficiencia energética, para mejorar la productividad y competitividad de la industria minera de APEC, incrementando las ventas de sus productos, y reduciendo el impacto ambiental y las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de su actividad.

### **5.2 Objetivos que se fijaron al Taller**

- Abrir una oportunidad a las economías miembros de APEC, a la industria minera y a las empresas de energía, para exponer y difundir las "mejores prácticas" en términos de conocimiento avanzado tecnológico y empresarial en el uso de la energía.
- Evaluar los indicadores relevantes de eficiencia energética en la industria minera y su impacto en la reducción de costos, aumento de productividad, reducción de emisiones y protección del medio ambiente.
- Evaluar las tecnologías de extracción y procesamiento de minerales intensivas en el uso de la energía.
- Compartir información sobre el mejoramiento de la eficiencia energética en el campo de la minería de las economías miembros de APEC: nuevos desarrollos tecnológicos especialmente enfocados a la reducción del consumo de energía.

- Definir mecanismos y políticas destinadas a mejorar la eficiencia con que utiliza la energía la industria minera de APEC.

En términos generales, el Taller permitió:

- Identificar medidas exitosas adoptadas por compañías y gobiernos destinadas a mejorar la eficiencia con que usan la energía las empresas mineras de APEC.
- Identificar políticas de eficiencia energética a ser consideradas por las economías de APEC.
- Identificar tecnologías de punta o "estado del arte" de las tecnologías adoptadas en empresas de algunos de las economías de APEC y presentación de tecnologías en estado de investigación y desarrollo.

### **5.3 Estructura temática del Taller**

Los temas principales a discutir en el Taller fueron: a) estudios de casos en relación a las "mejores prácticas" de eficiencia energética en la industria minera (extracción y procesamiento de minerales); b) Nuevos desarrollos en tecnologías mineras energéticamente eficientes; y c) políticas conducentes a mejorar la eficiencia energética en la minería.

Los participantes y expositores fueron seleccionados de acuerdo con los objetivos de la industria minera en este ámbito y de acuerdo a las calificaciones profesionales y académicas en las áreas principales del Taller. Los participantes en el Taller son reconocidos expertos de la industria minera, del sector público a cargo de promover las políticas de eficiencia energética en la minería, profesionales y ejecutivos de las empresas energéticas, e investigadores de las universidades y centros académicos. Los expositores elaboraron documentos que se encuentran disponibles en la página WEB [www.prien.cl](http://www.prien.cl) y en soporte electrónico CD, a distribuir por el Ministerio de Minería (ver que dice el contrato en este punto).

El programa fue estructurado de manera de proveer amplias oportunidades para el intercambio de informaciones, discusiones y establecimiento de contactos para colaboraciones ulteriores. El programa contempló once presentaciones, dos mesas redondas y una conferencia que cubrió las grandes interrogantes de la energía a nivel mundial y en una perspectiva de largo plazo. Ocho conferencistas de prestigio internacional fueron invitados a presentar ponencias en sus campos de especialidad, conjuntamente con especialistas locales igualmente calificados, para participar tanto como expositores de dichas ponencias como panelistas de las mesas redondas. El Taller duró dos días, a lo que se sumó una visita a las instalaciones mineras, básicamente la concentradora) de El Teniente.

### **5.4 Logística**

Para la elaboración del Taller se trabajó en estrecha relación con el Ministerio de Minería, GEMEED, con el Secretariado de APEC y se contó con el apoyo de CODELCO, ENAP, COLBUN y COCHILCO.

La sede para el Taller fue el Hotel Radisson de Ciudad Empresarial, Huechuraba, Santiago Chile.

Para la difusión del Taller se dispuso, como se señalara, de una página web:

[http://www.prien.cl/seminarios/taller\\_apec/](http://www.prien.cl/seminarios/taller_apec/)

## **6 Síntesis de los resultados del Taller: “Improving Energy Efficiency in the APEC Mining Industry y perspectivas futuras**

### **6.1 Sesión de debate y síntesis**

La calidad de las exposiciones, la variedad de los temas tratados en el Taller y el nivel del debate dejarán, probablemente, enseñanzas distintas a los distintos participantes y que madurarán en forma diferente. Sin pretender cubrir el conjunto de los temas en toda su extensión o complejidad, se pueden extraer algunas conclusiones generales o destacar temas de reflexión, entre otros:

- *la importancia de los consumos de electricidad en la molienda de minerales y la multiplicidad de parámetros que entran en juego.* En este aspecto, los mejoramientos apuntan a mejorar la granulometría y otras características del material de alimentación de la molienda, reducir el desgaste de recubrimientos interiores de los equipos, mejorar el diseño de los “lifters” de los molinos semiautógenos, minimizar detenciones, optimizar la reducción de tamaño, la homogeneidad del producto y el flujo de la pulpa. Las simulaciones pasan a ser fundamentales, ya que la operación del molino semeja una “caja negra”
- *conjuntamente con lo anterior, cabe destacar algunas tendencias generales en la conminución.* Los mejoramientos apuntan, entre otros objetivos, a: aumentar la velocidad, aumentar la potencia, aumentar la producción efectiva (mejorando la granulometría, reduciendo la manutención, reduciendo el desgaste, mejorando los ángulos de ataque). Parte importante de los esfuerzos en este campo se llevan a cabo en molinos existentes.
- *la comparación de los resultados globales entre la molienda semiautógena (SAG) y la molienda convencional.* El tema fue motivo de controversia, ya que la comparación de los consumos específicos no necesariamente favorecía a los primeros. Sin embargo, la predictividad de los resultados de los cambios de diseño sería mayor en el caso de los molinos SAG.
- *la fundición constituye, junto con el transporte, el área que concentra el consumo de combustibles en la minería del cobre.* El desarrollo tecnológico apunta hacia las



soluciones tipo Flash y, a futuro, fundición y conversión continua (en este campo se trabaja a nivel de plantas piloto de pequeña escala, es el caso de las investigaciones que se realizan en la Universidad de Chile). Lo anterior no debe llevar a ignorar las ventajas que presenta el Convertidor Teniente.

- *las empresas empiezan a incorporar en la fundición de minerales combustibles alternativos debido a los elevados precios que están teniendo los combustibles convencionales.* Existen importantes esfuerzos destinados a mejorar la eficiencia del proceso global de fundición y conversión (reducción al mínimo o reutilización de efluentes sólidos o gaseosos). Adicionalmente, en la calcinación de la caliza, para la producción del clinker y en las fundiciones, se empieza a considerar como combustibles los neumáticos, los aceites reutilizados y otros (dependiendo de los precios locales de la energía, en muchos países del orden de un 35% de los costos de operación de las fundiciones corresponde a la energía).
- *se analizó casos en que al abordar los costos de producción desde una perspectiva sistémica, se logran reducciones del consumo de gas natural del orden de 50%.* El movimiento del mineral mediante el sistema de cascadas (mezcla de teoría y empirismo), la reducción del tamaño del mineral incorporado al horno, la reducción de la costra de manganeso, el incremento de la temperatura del aire de combustión, la reducción de los equipos de producción mediante cambios de proceso, fueron algunas de las medidas adoptadas en la estrategia de optimizar energéticamente cada etapa del proceso.
- *el desarrollo indicadores desagregados de eficiencia energética es un tema particularmente relevante.* Se mostró los resultados de un análisis sistemático y detallado de la información del consumo energético efectivo en la minería en Chile (proveniente de casi el total del universo de la minería de cobre). Se planteó que éste representa un esfuerzo que no tiene paralelo en casi ningún país. Igualmente, se destacó el uso que el gobierno de Chile hizo de estos datos, durante la crisis del gas natural, lo que agregó un valor adicional al esfuerzo realizado
- *el control de los procesos es un aspecto de alta relevancia para mejorar la eficiencia con que se usa la energía.* , El tema permite evaluar el reemplazo de equipos existentes, optimizar la operación, detectar fallas en procedimientos, etc. Ejemplos relevantes de aplicación de la tecnología expuesta lo constituyó el manejo de la molienda de minerales, permitiendo aumentar la producción y reducir el consumo de energía en casi 10%. Durante el debate se planteó la duda respecto de su aplicabilidad en casos en que la instrumentación es insuficiente (lo que ocurre en la mayoría de las plantas industriales y mineras) y la eficacia de las inferencias derivadas del método “observer” sugerido por el expositor.
- *Visión futura de la minería tanto en los aspectos económicos como sociales.* La responsabilidad social de la minería fue destacada en múltiples oportunidades. Un

principio para el desarrollo futuro en que también hubo coincidencias fue en la necesidad de asegurar la continuidad de las operaciones (la que permite reducir significativamente el consumo de la energía).

- *¿existirá energía suficiente para los desarrollos mineros futuros?* La respuesta fue afirmativa, el problema es el precio. Quedó claro que la tendencia es al incremento de éstos y que los precios que hemos estado pagando serán cosa del pasado; por ejemplo, se señaló que, en América del Sur, es muy difícil que Argentina o Bolivia mantengan los precios del gas natural a US\$3,5 por millón de BTU, siendo probable que dicho precio tienda a duplicarse como ocurre con el precio internacional. Algo similar debería suceder con el petróleo. Lo descrito deberá traducirse en un incremento de los esfuerzos en uso eficiente de la energía y, por ende, menos contaminación. En la misma mesa se pronosticó la desaparición de las fundiciones de concentrados de cobre, lo que fue debatido y desmentido después.
- *los conceptos de derecho a la eficiencia, de pasivo ambiental minero y el incremento de precio de la energía por razones de sustentabilidad.* Este tema va en la misma línea de pensamiento que el de la valorización de las externalidades, vacío conceptual y práctico a resolver por su importancia para la política energética y ambiental, a pesar de las complejidades teóricas que implica. . Por último, y consistente con los planteamientos anteriores, se planteó que la sustentabilidad ambiental de las explotaciones mineras debe ser cubierta por los usuarios (básicamente instalados en los países desarrollados)
- *el desarrollo tecnológico y los desafíos futuros de la minería.* Los desafíos futuros de la minería no sólo tienen que ver con la energía sino que con la caída de la ley, la complejización de los recursos, la profundización de los yacimientos, la necesidad de disponer de los recursos humanos requeridos y asegurar el desarrollo sustentable de la actividad. En términos generales, se integran en una misma perspectiva los desafíos del negocio con los desafíos tecnológicos. Particularmente importante fue el planteamiento respecto de que la innovación es la inversión más rentable. Dicha afirmación, siendo apreciada por los participantes, tuvo una contrapropuesta, la que señaló que invertir en jóvenes talentosos es aún más rentable. Otra opción que empieza a ser manejada en Chile consiste en integrarse internacionalmente con empresas del rubro, proveedores y centros de excelencia, para rentabilizar y acelerar el proceso de innovación. En este caso, la inversión directa en I&D puede mostrar una tendencia a la baja, a pesar del reconocimiento dado a la rentabilidad de este tipo de inversión
- *la reducción del transporte de materiales debido al impacto de la energía en los costos constituye un objetivo central de la I&D.* Conjuntamente con ello y en distintos planos temporales la continuidad de las operaciones constituye otro objetivo de la I&D, así como la biominería, el desarrollo humano, la sustentabilidad en el sentido más amplio y el desarrollo del mercado (calidad de productos y nuevas

aplicaciones). Incluso la exploración submarina empieza a constituirse en un tema de alta relevancia.

- *relevancia de las biotecnologías en la minería, en relación a las opciones más convencionales.* Se planteó que la biotecnología no se contrapone con la permanencia y desarrollo de la piro metalurgia ya que se trata de tecnologías complementarias más que contrapuestas (se destacó las ventajas de la pirometalurgia en la recuperación de cobre y metales preciosos).
- *el análisis específico del uso eficiente de la energía en China.* En China la eficiencia energética es una necesidad debido a los “black out” frecuentes por falta de capacidad en generación y líneas de transmisión, a los desabastecimientos de carbón, petróleo y electricidad, a la competitividad de la industria (en el caso del acero, la energía representa un 25% del costo), reducción de la polución y el desarrollo sustentable. Si bien la intensidad energética se redujo en casi 4% por año durante casi 20 años, queda un largo camino por hacer. Por estas razones, se está incorporando un plan de mediano plazo, que apunta entre otros objetivos a introducir leyes de eficiencia energética, desarrollo tecnológico, incentivos financieros para reducir los impactos ambientales, atención a la seguridad de abastecimiento, mejoras en la forma de diseñar las políticas energéticas, acuerdos voluntarios, etc.

## **6.2 Conclusiones y principales líneas de acción**

Los delegados al Taller concordaron los siguientes puntos relativos a eficiencia energética en la minería.

1. Dar continuidad al trabajo al interior de APEC relacionado con el mejoramiento de la eficiencia energética en la industria minera. Se considera que mejorar la eficiencia energética en minería es una tarea que requiere una continuidad en su desarrollo, congruencia de objetivos y actividades, y acciones en las cuales se requiere la participación conjunta de los actores de la industria: gobiernos, industria, y sector académico e investigador. En lo inmediato, se identificaron dos áreas de trabajo:
  - Armonización de indicadores de eficiencia energética que son utilizados en los diferentes países de APEC. Esta es una primera prioridad que permitirá realizar proyectos con una base sólida de definiciones.
  - Identificar un proyecto relacionado con el uso de “mejores practicas en eficiencia energética en la industria minera de APEC”, que pueda desarrollarse en conjunto con la Industria minera, y otros grupos Expertos del EWG, con una proyección de mediano plazo (2 a 5 años).
2. Seguridad energética y derecho al uso eficiente de la energía.

De el Taller se concluye que la eficiencia energética es un bien público de carácter global, por ser esencialmente contributiva al medioambiente. Se trata de examinar y resolver la ecuación entre intensidad energética y desarrollo, relacionando el mejoramiento de la eficiencia energética con el concepto de seguridad energética y desarrollo en términos integrales. Se trata de que la humanidad cuente con seguridad en el abastecimiento de energía en el mediano y largo plazo, y al mismo tiempo cuente con mayores herramientas para el desarrollo.

3. Generación de políticas relacionadas con la eficiencia energética en la minería como parte de la contribución de la minería al crecimiento y desarrollo sustentable.

El Taller considera relevante que el concepto de mayor eficiencia energética sea incorporado en la política pública, tanto en el sector minero, como en el energético, y en el de la sustentabilidad ambiental.

4. Investigación y desarrollo en materia de eficiencia energética.

El Taller considera que la Investigación y desarrollo energético es una llave para dar mayor sustentabilidad a la industria minera. Por ello, deben reforzarse los programas relacionados al tema en las economías de APEC

5. Tomando en cuenta los buenos resultados obtenidos en el Taller, se considera indispensable que GEMEED dé continuidad a este trabajo. Para ello, se recomienda:

- Continuar el desarrollo de proyectos y programas de trabajo relacionados con la minería y la eficiencia energética, cumpliendo con su mandato de los términos de referencia.
- Potenciar del mejor modo posible la participación de los tres estamentos involucrados en el presente Taller: industria, sector académico y gobierno, para una mejor generación e implementación de los futuros programas y trabajos relacionados al tema de eficiencia energética en minería.

## 7 Referencias

- William T. Choate, John A. S. Green, Enero 2003, "U.S. Energy Requirements for Aluminum Production Historical Perspective, Theoretical Limits and New Opportunities", U.S. Department of Energy Energy Efficiency and Renewable Energy Washington, D.C.
- Plunkert, Patricia A. Aluminium, U.S. GEOLOGICAL SURVEY MINERALS YEARBOOK—2002
- Michael D. Fenton, Iron and Steel, U.S. GEOLOGICAL SURVEY MINERALS YEARBOOK—2002
- William S. Kirk, Iron Ore, U.S. GEOLOGICAL SURVEY MINERALS YEARBOOK—2002
- Daniel L. Edelstein, Copper, U.S. GEOLOGICAL SURVEY MINERALS YEARBOOK—2002
- Hendrik G. van Oss, Cement, U.S. GEOLOGICAL SURVEY MINERALS YEARBOOK—2002
- Ernst Worrell and Christina Galitsky, January 2004, Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory
- Nathan Martin, Ernst Worrell, and Lynn Price, 1999, Energy Efficiency and Carbon Dioxide Emissions Reduction Opportunities in the U.S. Cement Industry Environmental Energy Technologies Division Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Ernst Worrell, Nathan Martin, Lynn Price, 1999, Energy Efficiency and Carbon Dioxide Emissions Reduction Opportunities in the U.S. Iron and Steel Sector Environmental Energy Technologies Division

## **Anexo 1: Descripción de los procesos considerados**

### **7.1 Aluminio**

El mineral más corriente para la producción de aluminio es la bauxita y se encuentra en zonas tropicales o subtropicales como África, India Occidental, Sudamérica y Australia. La bauxita es refinada para obtener alúmina, la que luego es reducida electrolíticamente para obtener aluminio. Las instalaciones de producción de aluminio primario se encuentran repartidas por todo el mundo, normalmente en áreas donde existe abastecimiento de energía abundante y de bajo costo, habitualmente en países con grandes y económicamente explotables recursos de hidroelectricidad. Dos a tres toneladas de bauxita se requieren para producir una tonelada de alúmina y dos toneladas de alúmina se requieren para producir una tonelada de aluminio metálico.

#### **Minería de bauxita,**

Alrededor del 80% de la minería de bauxita se realiza en minas de superficie y el saldo, en minas subterráneas, principalmente en Hungría y el sur de Europa. En la mayoría de las minas, aunque no en todas, existe un manto que cubre el mineral que puede ser de 70 metros o más. Cuando el depósito está endurecido se requiere tronadura para liberar el mineral. La bauxita extraída es cargada en cargadores o trenes y es transportada a plantas de chancado y lavado.

A diferencia de los minerales base de otros metales, la bauxita no requiere de procesamientos complejos debido a que la mayoría de los depósitos tienen leyes aceptables o pueden ser mejorados por procesos relativamente simples y económicos de remoción de arcilla, mediante una combinación de lavado y uso de equipos ciclones para realizar la separación del mineral; finalmente, el mineral se seca para facilitar y economizar el transporte.

#### **Refinación de alúmina,**

La refinación de alúmina se realiza comúnmente mediante el proceso Bayer para producir alúmina a partir de bauxita, debido a que sigue siendo el método más económico para realizar este proceso.

La bauxita, se digiere con solución caliente de soda cáustica para que la alúmina quede en solución en forma de aluminato de sodio. Después de separar el líquido del residuo insoluble, se precipita el trihidrato de alúmina,  $\text{Al}(\text{OH})_3$  y se calcina para producir la alúmina pura que se envía a las plantas de reducción.

En las plantas de proceso Bayer se pulveriza la bauxita, se procesa en digestores con lejía, que queda de un ciclo anterior, cal y carbonato sódico para obtener la necesaria concentración de hidróxido de sodio. Después de la digestión, y con vapor de  $3.5 \text{ Kg/cm}^2$ , se deja sedimentar el líquido y se filtra para separar el residuo insoluble. Dicho residuo contiene un porcentaje elevado de óxido de hierro y recibe el nombre de lodo rojo. La solución de aluminato sódico es transportada a los tanques de precipitación, donde se le añade trihidrato de aluminio, procedente de una operación anterior, y se deja enfriar lentamente. Poco a poco se va formando el trihidrato por hidrólisis del aluminato sódico en presencia del núcleo cristalino. El

trihidrato granular se hace pasar por espesadores y filtros, y luego se calcina para extraerle el agua libre y combinada. La calcinación se realiza a una temperatura superior a  $1000^{\circ}\text{C}$  para obtener la alfa – alúmina no higroscópica. Esta alúmina calcinada es enviada a las plantas de reducción.

### **Fundición y refinación de aluminio.**

El aluminio se obtiene por la electrólisis de la alúmina disuelta en una criolita fundida ( $\text{F}_6\text{AlNa}_3$ ).

El proceso de electrólisis se efectúa en una cuba electrolítica llamada también baño de aluminio. El tamaño de la celda depende de la corriente de electrólisis que se emplee. La celda electrolítica es una caja de acero revestida interiormente de carbono. La tensión en las celdas es de 5V de los cuales 1,7 son útiles y el resto se consume por resistencia. Las celdas se colocan en serie, para que constituyan conjuntos de 200, 500 y hasta 1000 V. La intensidad alcanza valores del orden de 100.000 a 125.000 A.

La alúmina se suministra al baño desde arriba. Lo que provoca, debido al enfriamiento por el aire del ambiente, la aparición de una costra de electrolito. En la superficie lateral se forma también una capa del electrolito solidificado, llamada guarnición, que protege el revestimiento contra la destrucción, protege el baño contra el frío y evita que la corriente se pierda a través del revestimiento de carbón lateral. El electrolito puede ser criolita, pero se acostumbra agregarle algo de fluoruro de calcio para reducir el punto de fusión y aumentar la fluidez del baño. Actualmente se emplean de ordinario los baños de aluminio monoanódicos con un ánodo de autococción y el suministro de corriente por la parte superior de éste.

El aluminio fundido es más pesado que el electrolito de criolita y se acumula en la solera del baño debajo de la capa del electrolito, donde sirve de cátodo. El aluminio se extrae normalmente a los tres o cuatro días con ayuda de un caldero de vacío o sifón. A veces, el aluminio se evacua una vez por día.

A causa de la oxidación electrolítica de los ánodos se consumen aproximadamente  $2/3$  de kilogramo de carbono por cada kilogramo de aluminio metálico que se produce. Las impurezas de los ánodos (hierro o silicio) se disuelven en el baño, se reducen junto con la alúmina y contaminan el aluminio metálico; por tanto, es indispensable que sean muy puros los materiales con que se hacen los electrodos de carbono.

El total de energía asociada a la producción de aluminio primario a partir de bauxita es de aproximadamente 23,78 kWh/kg de aluminio de los cuales más de un 65% se asocia a la reducción electrolítica.

## **7.2 Cobre**

### **Área Mina**

Las minas a rajo abierto, en general, se explotan por un sistema de bancos o cortes escalonados, que involucran perforación, tronadura, carguío y transporte del material estéril (lastre o minerales de baja ley), el que es depositado en botaderos; y carguío y transporte del

mineral hacia la planta de tratamiento. La razón lastre/mineral es una característica específica de cada yacimiento y varía entre 1/1 y 4/1. En el caso de estas minas se generan dos corrientes de materiales: lastre, que se transporta a disposición final, y mineral que continúa en el proceso de refinación.

En la minería del cobre a rajo abierto se hace uso intensivo de petróleo diesel (equipo minero mayor y menor). En los yacimientos de mayor tamaño se utilizan sistemas de correas transportadoras para el mineral y lastre, que reemplazan el uso de camiones. Los factores que más inciden en los consumos de energía en esta área del proceso son la razón lastre/mineral y la distancia media de acarreo tanto del mineral a la planta como del lastre a los botaderos.

Las minas subterráneas que explotan yacimientos de cobre en forma masiva, utilizan generalmente el sistema de hundimiento de bloques. En el nivel inferior, que corresponde al nivel de producción, se extrae el mineral, mediante equipos mecanizados (LHD) o sistemas gravitacionales transportando el mineral hasta el nivel de acarreo. Es en este nivel desde donde el mineral es transportado, mediante camiones, correas y por ferrocarril, hasta las plantas de tratamiento. En la explotación de minerales de cobre en minas subterráneas se hace uso de petróleo diesel (camiones y LHD). Los consumos de energía eléctrica en esta etapa se encuentran asociados a los sistemas de ventilación, aire comprimido, chancado y en algunos casos transporte mediante correas o ferrocarril.

Las leyes del mineral varían de una mina a otra, como también a través del tiempo, fluctuando entre 0,5% y 2,5% de cobre.

A partir de la planta de tratamiento, los procesos son diferentes según se trate de minerales oxidados o sulfurados.

### **Tratamiento de minerales oxidados (Lixiviación – Extracción por Solvente – Electrodeposición)**

Las áreas de lixiviación, extracción por solvente y electroobtención, agrupan bajo el concepto de hidrometalurgia.

El mineral proveniente de la mina se somete, en primer lugar, a un proceso de chancado, el que dependiendo del tipo de mineral y proceso puede constar de una o más etapas, hasta obtener el tamaño de las partículas adecuado al proceso de lixiviación que se aplicará. El tamaño óptimo varía entre 1" y ¼". Luego el mineral se aglomera o cura con ácido para posteriormente ser sometido a lixiviación. El proceso de aglomerado y curado se efectúa preferentemente en tambores aglomeradores rotatorios, pudiendo también realizarse en las correas transportadoras. En esta etapa, el consumo de energía es fundamentalmente eléctrico y corresponde a las etapas de chancado, clasificación y transporte por correas, del mineral, entre dichas etapas.

La lixiviación es un proceso que se basa en la propiedad que tienen los minerales oxidados de cobre de ser atacados por soluciones ácidas, solubilizando los compuestos oxidados de cobre contenidos en ellos. La lixiviación se puede realizar:

- o **in situ** : en general se utiliza para tratar minerales de baja ley;
- o **bateas** : ya sea por agitación o por percolación;
- o **pilas** : la que más se utiliza en la actualidad, en especial en todos los nuevos proyectos de óxidos.



Las pilas de mineral se construyen generalmente sobre una carpeta impermeable de PVC y en la parte superior se instala un sistema para regar por goteo con la solución ácida (ácido sulfúrico). Por la parte inferior, a través de canaletas especiales se va retirando la solución ácida cargada con cobre que es la que posteriormente se somete a extracción por solvente (SX).

En las faenas de gran tamaño, los equipos de formación y descarga de las pilas utilizan energía eléctrica, en cambio en faenas medianas a pequeñas, la formación y descarga de pilas se efectúa con equipos de movimiento de materiales (cargadores frontales, camiones y apiladores) que utilizan petróleo diesel.

La solución ácida cargada con cobre, proveniente de la lixiviación, pasa a la etapa de extracción por solvente, donde se pone en contacto con un solvente orgánico que le extrae el cobre. Luego este solvente orgánico, en la etapa de re-extracción, le traspassa el cobre a una solución ácida con bajo contenido de cobre proveniente de la etapa de electrodeposición, generando así un electrolito rico y regenerando el solvente orgánico que vuelve a ser utilizado. En la extracción por solvente el consumo de energía es preferentemente eléctrico y se utiliza para bombeo y manejo de soluciones.

El electrolito rico se lleva a la etapa de electrodeposición (EW), proceso que se realiza en celdas generalmente de concreto polimérico, utilizando un ánodo insoluble de plomo y un cátodo permanente de acero inoxidable, que es donde se deposita el cobre que contiene el electrolito al aplicarse corriente continua. Los productos de la electrodeposición son: cobre metálico en el cátodo EO (99,99% Cu) y ácido sulfúrico que se regenera y se recircula a la etapa de lixiviación o extracción por solvente. Al igual que en la anterior, en la etapa de electrodeposición el consumo energético está constituido en su casi por energía eléctrica. Existe un pequeño consumo de combustibles para mantener la temperatura de las soluciones (calderas que pueden funcionar con gas, petróleo diesel o fuel oil).

### **Tratamiento de Minerales Sulfurados - Concentradora**

El mineral proveniente de la mina se somete primero a un proceso de chancado (en seco), que dependiendo del tipo de mineral y el proceso puede constar de hasta cuatro etapas, para alcanzar un tamaño de partículas inferior a 3/8".

Luego, el mineral chancado se somete a un proceso de molienda húmeda, obteniéndose el material apto para la flotación.

El proceso de flotación consiste en la extracción de las partículas de minerales que contienen el cobre en combinación con el azufre. La pulpa de mineral proveniente de la molienda, que contiene entre un 25 y un 30 % de sólidos, se lleva a celdas de flotación, donde se le agregan los reactivos de flotación (colector / espumante). De esta forma, se produce la separación del material estéril, el que es extraído por la parte inferior de la celda en la forma de relave y depositado en los tranques de relaves. Por la parte superior se obtiene el concentrado de cobre y molibdeno.

El concentrado mixto cobre/molibdeno se lleva a espesadores para extraerle parte del agua que contiene y luego se somete a una flotación selectiva de la molibdenita, obteniéndose

concentrado de cobre (20 – 45% Cu). Los concentrados de cobre se llevan a espesadores para recuperar parte del agua y luego los concentrados húmedos se llevan a filtros, resultando finalmente un producto que es concentrado de cobre con alrededor de 8 -10% de humedad, el que se puede exportar como tal.

Todas las etapas descritas anteriormente de tratamiento de los minerales sulfurados de cobre son altamente consumidoras de energía eléctrica, tanto para el chancado, como en la molienda, transporte de pulpas y soluciones y proceso de flotación.

El principal consumo de combustibles en la concentradora corresponde al secado de concentrados.

### **Pirometalurgia - Fundición**

Los concentrados de cobre son llevados a la fundición para su refinación. En primer lugar es necesario extraerles la humedad (10%). Este proceso se realiza en secadores rotatorios o de lecho fluidizado, hasta obtener un producto con una humedad inferior al 0,2%. El concentrado se alimenta a los equipos de fusión (tales como el horno reverbero, el Convertidor Teniente y el horno Flash) obteniéndose un eje o mata de cobre con un 45- 75% de cobre, dependiendo del grado de conversión alcanzado según el horno de fusión utilizado. La escoria que se produce en los hornos de fusión, dependiendo del contenido de cobre de ella, va a botaderos de disposición final (ley de cobre < 0,8%) o a tratamiento posterior para recuperar el cobre contenido, tratamiento que puede ser pirometalúrgico o hidrometalúrgico.

El eje o mata se lleva posteriormente a la etapa de conversión, operación que se efectúa en los equipos denominados convertidores (Pierce-Smith), donde se obtiene un cobre blister con un contenido de 98 – 99% de cobre. La etapa final es un proceso de refinación a fuego, moldeándose posteriormente los ánodos.

La fundición es el área más altamente consumidora de combustibles (fuel oil y petróleo diesel) de todo el proceso de obtención del cobre, tanto en las etapas de secado a muerte de los concentrados (hasta 0,2% de humedad), como en los hornos reverbero, convertidores, calcinadores y en las etapas de refino y moldeo. Sin embargo, un insumo fundamental en el proceso de fusión/conversión es el oxígeno, el cual se obtiene a partir del aire en plantas especiales, que son grandes consumidoras de energía eléctrica.

Los concentrados de cobre provenientes de la concentradora, luego de ser tratados por vía pirometalúrgica en la fundición, generan tres corrientes o flujos de materiales. El primero, escoria que va a disposición final. El segundo, un flujo de gases que tiene como destino las plantas de ácido sulfúrico, donde se tratan entre un 65% y 90% de ellos, dependiendo del nivel de captación de la fundición. La última corriente corresponde al cobre blister o anódico, cuyo contenido de cobre bordea el 99%. Para el análisis de esta etapa se identifican una serie de subetapas que permiten determinar los consumos específicos de combustibles y energía eléctrica, a saber, planta de oxígeno, planta de secado de concentrados, planta de generación de aire comprimido, planta de generación de vapor, etc.

### **Planta de ácido sulfúrico**

Los gases provenientes del proceso de fusión/conversión del cobre se captan mediante campanas y se tratan primeramente en precipitadores electrostáticos para extraerles el polvo que contienen. Luego se conducen a la planta de ácido, donde ingresan al módulo de limpieza y luego al módulo de contacto, que es donde se produce la transformación del SO<sub>2</sub> gaseoso en ácido sulfúrico, con un nivel de conversión del 99%.

En esta etapa se consume básicamente energía eléctrica, tanto en los precipitadores electrostáticos, como en la planta de ácido y en los sopladores, bombas, etc.

### **Refinación electrolítica**

Los ánodos, que contienen alrededor de un 99,7% de cobre, se llevan a la refinería electrolítica para una última etapa de refinación. Allí son instalados en celdas, generalmente de concreto, alternando con el cátodo, que es una lámina madre de cobre electrolítico en las refinerías convencionales, y en las refinerías de cátodo permanente, una lámina de acero inoxidable. Los cátodos se sumergen en el electrolito, solución de ácido sulfúrico y sulfato de cobre. Por aplicación de una diferencia de potencial, el cobre impuro del ánodo se disuelve en la solución y se deposita en el cátodo. Los metales más electropositivos que el cobre quedan disueltos en el electrolito, mientras que los metales más electronegativos se depositan en el fondo de la celda, constituyendo lo que se denomina "barros anódicos". Los barros anódicos que contienen, entre otros, oro, plata, selenio y telurio son tratados posteriormente en la planta de metales nobles.

El producto que se obtiene en la refinería electrolítica es un cátodo de alta pureza con un contenido mínimo de cobre de 99,99%.

En la refinación electrolítica se consume fundamentalmente energía eléctrica. Se ocupan pequeñas cantidades de combustible para mantener la temperatura del electrolito en los niveles requeridos por el proceso (45 – 60 °C).

Adicionalmente a todos los procesos anteriores, existen consumos de energía en las plantas de tratamiento de residuos industriales líquidos y sólidos y en los servicios generales y administrativos.

### **7.3 Cemento**

El cemento es un material inorgánico y no metálico con propiedades de ligadura hidráulica y se usa como material aglomerante en la construcción de edificios y obras civiles. Es un polvo fino, generalmente gris, que se compone de una mezcla de los minerales hidráulicos del cemento al los que se le agregan una o más formas de sulfato de calcio. Cuando se mezcla con agua, forma una pasta, que endurece debido a la formación de los hidratos minerales del cemento. El cemento es el agente de aglomerante en el hormigón, que es una mezcla de cemento, agregados minerales y agua.

El cemento es obtenido a partir del clinker (resultante de la calcinación de la caliza, normalmente carbonato de calcio, acompañada de pequeñas cantidades de óxidos de Si, Al, Mg y de Fe), el que se mezcla con aditivos para obtener cemento. Los aditivos controlan su comportamiento, sus propiedades mecánicas y el proceso de fraguado. La industria del cemento está compuesta por plantas de clinker, que producen el clinker, y, en algunos casos, por plantas separadas de cemento en donde se muele el clinker y se dosifica el cemento, y

también por plantas integradas (es el caso en Chile) en que se realizan ambos procesos. El proceso de elaboración del clinker consiste en tomar rocas calcáreas (generalmente de piedra caliza) y arcillas en proporciones adecuadas y molerlas intensivamente, de manera que el compuesto (mayoritario) de la caliza se vincule íntima y homogéneamente con los compuestos (minoritarios) de las arcillas ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). El producto de la mezcla ingresa a un horno a alta temperatura y sale como clinker. La carga del horno, así como la temperatura son ajustadas dependiendo de la composición química de las materias primas y del tipo de cemento deseado. Las plantas de cemento muelen el clinker y le agregan aditivos para producir cemento. Los cuatro pasos de la producción de cemento son la extracción, la preparación de la materia prima, la producción de clinker y la molienda y mezcla final (o cemento).

### **Extracción**

Las materias primas más comunes para la producción de cemento son: caliza, pizarra y arcilla. La mayoría de las extracciones se dan en una cantera adyacente o muy cerca de la planta. La caliza o la pizarra son extraídas mayoritariamente de canteras abiertas, sin embargo, la minería subterránea también es posible, las materias primas recogidas se seleccionan, se trituran y se aplastan para que la mezcla tenga la consistencia y la composición química requerida por los sistemas de piroprocesado. Por lo menos se requieren 1,5 a 1,75 toneladas de materia prima para producir una tonelada de cemento Pórtland.

### **Preparación de la Materia Prima.**

La preparación de la materia prima es un proceso que requiere una alta cantidad de energía eléctrica (cerca a los 25-35 kWh por tonelada de materia prima). El proceso de preparación de la materia prima difiere según el tipo de piro-procesado que será utilizado posteriormente, existe el proceso vía seca y el proceso vía húmeda. En el proceso vía seca, las materias son molidas en un molino de bolas o de rodillos. Las materias primas son secadas adicionalmente utilizando el calor de desecho proveniente del horno de producción de clinker, antes de ingresar al piro-procesado. El proceso de vía húmeda, las materias primas son molidas con la adición de agua, en un molino de bolas para producir una mezcla que tiene por lo general entre 24% - 48% de agua. Existen varios grados de procesamiento vía húmeda, por ejemplo se realiza un procesamiento semi-húmedo de manera de reducir los consumos de energía en el horno de clinker.

### **Producción de clinker (piro-procesamiento)**

La producción de clinker es la etapa de producción del cemento más energointensiva, sobre el 90% del uso total de energía de la industria. El clinker es producido en grandes hornos en donde se evapora el contenido de agua de la carga de materia prima, se reduce el carbonato (calcinación), y se obtiene el clinker, base del cemento Portland.

El tipo de horno utilizado mayoritariamente es un horno rotatorio de alta capacidad. Estos hornos tienen la forma de un cilindro de hasta 8 metros de diámetro y unos 100 y más metros de largo, que se instala en un ángulo de  $3^\circ$  -  $4^\circ$  y que gira a 1 - 3 revoluciones por minuto. La materia prima molida, alimentada por la parte superior del horno, se mueve hacia la llama en contracorriente a los gases de combustión. En la zona de sinterizado (zona de "clinqueado"), los gases de combustión alcanzan una temperatura de entre 1800 a 2000 °C. Cuando se procesan materias primas por vía húmeda, el agua debe primero ser evaporada en la zona de

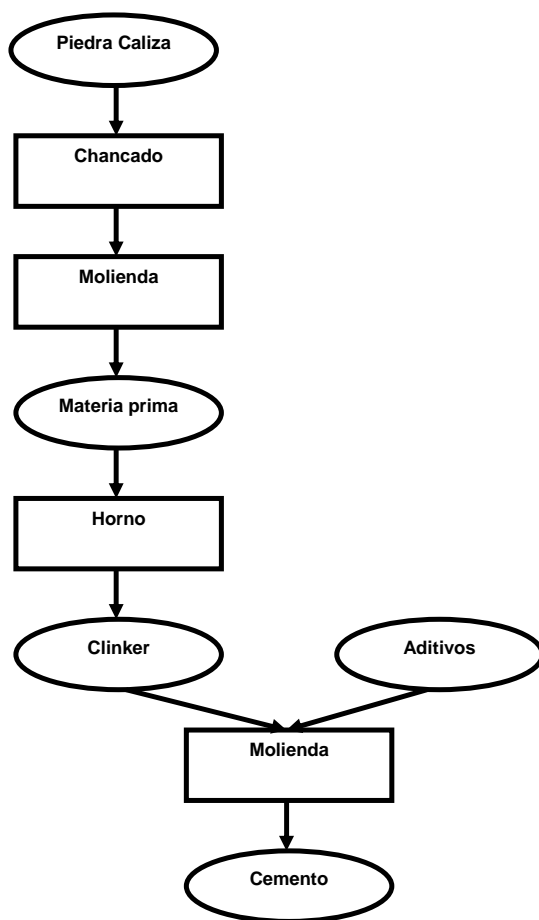
baja temperatura, aumentando el consumo de energía. El uso de combustibles puede variar entre 5.300 y 7.100 MJ por tonelada de clinker. En el procesamiento de materia prima seca (humedad cercana al 0,5%) se reducen los requerimientos de energía. Los hornos modernos introducen precalentadores de suspensión multietapas y tecnologías de pre-calcinado. Esta última tecnología consiste en una segunda combustión añadida a un precalentador convencional que permite una reducción adicional de los consumos de energía. Un horno moderno puede requerir valores tan bajos como 2.900 o 3.000 MJ por tonelada de clinker.

Una vez formado el clinker, éste debe ser enfriado rápidamente. Las principales tecnologías usadas en el enfriamiento son: el refrigerador de rejilla, el de tubo o planetario. Los consumos de energía asociados al proceso de refrigeración varían entre 9 y 12 kWh por tonelada de clinker. Los hornos equipados con calentadores de ciclón o precalentadores utilizan energía adicional para los ciclones y ventiladores. El consumo típico de energía de un horno de precalentador de cuatro etapas de suspensión se estima en 20-25 kWh por tonelada de clinker. Para la producción de cementos de baja alcalinidad se requiere un ventilador de by-pass, que consume típicamente 2 kWh por tonelada. Por lo tanto, el consumo total de energía eléctrica en el horno de clinker se estima en 30 kWh por tonelada de clinker.

### **Molienda final (Producción de cemento)**

Una vez enfriado el clinker se almacena en silos. Para producir cemento en polvo, los nódulos de clinker son molidos. Este último proceso se realiza en molinos de bolas, de rodillo, en prensas de rodillo, o en combinación de estos equipos. En el proceso de molienda del clinker se agregan aditivos (3% a 5%) para controlar las propiedades del cemento. El consumo de energía para moler depende de la consistencia requerida para el producto final y de los aditivos agregados. A modo de ejemplo, los consumos de energía en molinos modernos de bolas se encuentran entre 32 y 37 kWh por tonelada.

Figura A1-1: Esquema general del proceso de producción de Cemento.



#### 7.4 Hierro y Acero

El acero es una aleación de hierro que usualmente contiene menos de un 1% de carbono. Hoy en día se utilizan dos tipos de tecnologías para producir acero: El horno de oxígeno básico (HOB) y el horno de arco eléctrico (HAE). A pesar de que cada uno de estos procesos requiere diferentes insumos, el resultado de ambos es acero fundido, el que será posteriormente conformado en productos de acero.

Los insumos del HOB son hierro fundido, chatarra de acero y oxígeno. En el HAE los insumos son electricidad y chatarra. Los HOB son utilizados principalmente en la producción de grandes volúmenes de aceros al carbono, mientras los HAE se utilizan en la producción de menores volúmenes de aceros especiales y de aleación.

Cuando se produce acero mediante HOB, se requiere realizar las etapas previas de producción de coque y la producción de hierro, cada una de estas etapas se explican. En la producción de acero mediante HAE estas etapas no son requeridas.

El coque, que actúa como combustible y como fuente de carbono para la reducción de los óxidos de hierro (mineral de hierro), es producido por calentamiento del carbón en ausencia de oxígeno a altas temperaturas en hornos de coque. El arrabio (fierro con alto contenido de

carbono, alrededor de 4% de C), es producido por calentamiento del coque, el mineral de hierro y piedra caliza en un alto horno.

En el HOB, el arrabio producido en el alto horno, es combinado con fundente y chatarra de acero, mientras se inyecta oxígeno de alta pureza, el que oxida el arrabio reduciendo el contenido de carbono a valores inferiores a 1%, normalmente del orden de 0,1%. Este proceso junto al proceso de producción de coque, el de producción de arrabio, más los procesos de conformado y acabado forman en conjunto el proceso de producción de acero. Alternativamente, en un HAE la materia prima es principalmente chatarra de acero, la que es fundida y refinada por una corriente eléctrica que pasa desde electrodos a través de la chatarra. A partir del acero fundido en cualquiera de los procesos se forman lingotes o placas las que son laminadas como producto final.