



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MANUAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA MINERÍA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

REYNALDO ANDRÉS CABEZAS CIFUENTES

PROFESOR GUÍA:
LEONEL ALEJANDRO NÚÑEZ LAZO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ÁLVARO ALEJANDRO VALENCIA MUSALEM
CHRISTIAN FELIPE IHLE BASCUÑAN

SANTIAGO DE CHILE
2016

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil Mecánico
POR: Reynaldo Andrés Cabezas Cifuentes
FECHA: 09/05/2016
PROFESOR GUÍA: Leonel Núñez Lazo

MANUAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA MINERÍA

En la minería del cobre (MC) los métodos de procesamiento corresponden a hidrometalurgia para los minerales oxidados y pirometalurgia para los minerales sulfurados. Las principales fuentes de energía consisten en combustibles y electricidad.

El presente trabajo de título tiene como objetivo general diseñar un manual de eficiencia energética para minería chilena (MCh). Los objetivos específicos son: i) desarrollar una caracterización de sistemas de consumo de energía (SCE) e identificar sistemas energéticamente relevantes (SER), ii) identificar oportunidades de EE aplicables, iii) desarrollar una metodología para análisis de oportunidades y medidas de EE (MEE), iv) desarrollar una metodología para construcción del proyecto de inversión en EE (PIEE), y v) desarrollar un ejemplo de oportunidad y MEE.

Los principales resultados del proyecto señalan que:

- i. En MC los SER consisten en sistemas de combustibles y sistemas eléctricos. Los primeros se conforman de los sistemas motrices de combustión interna, sistemas para generar calor directo y sistemas de calderas. Los sistemas eléctricos se conforman de sistemas motrices eléctricos y sistemas electroquímicos.
- ii. En MC la mayoría de las oportunidades de EE corresponden a mejora de gestión y control de parámetros de operación.
- iii. La metodología de análisis de oportunidades y MEE consiste en el análisis del consumo energético, análisis de usos energético, estudios de pérdidas y oportunidades de mejora en los procesos, determinación de la factibilidad técnico-económica de cada MEE, y finalmente priorización según criterios de la empresa.
- iv. La metodología de construcción del proyecto de inversión en EE (PIEE) consiste en seleccionar el subconjunto de MEE que integran el PIEE, evaluar el impacto productivo del subconjunto de MEE en la operación de la empresa, evaluar la nueva estructura de costos de producción, realizar la evaluación económica del PIEE y, por último, evaluar el mecanismo de financiamiento del PIEE.
- v. El desarrollo de un ejemplo de gestión de flota de camiones como MEE, con respecto a la carga, refleja que disminuir la carga por debajo de la capacidad de diseño es ineficiente pues aumenta el consumo de combustible. En efecto, para una operación similar a la de la minera Gaby, cargar un camión bajo el 100% de su carga útil puede producir aumento de los costos de combustibles entre USD\$ MM 1 - USD\$ MM 3 por año.

El trabajo desarrolla un texto guía de EE para minería, en el cual se describe un procedimiento que permite recolectar la información necesaria para conocer el comportamiento de la energía en la faena; de esta forma se pueden tomar decisiones que proporcionen reducciones en energéticos, disminuyendo los costos de operación, lo que repercute en una mejor competencia en el mercado internacional de cobre.

Dedicada a mi familia, especialmente a mi mamá y papá por estar siempre apoyándome para poder terminar esta etapa de mi vida. A mis amigos del colegio que siempre estuvieron conmigo a pesar de aparecer menos. A mis amigos de la universidad que me aguantaron y permitieron sacar la vuelta cada vez que podía. A los profesores y funcionarios de mecánica que me abrieron las puertas de su oficina y permitieron conocer un poco más de sus vidas. Por último, a la polera del arsenal que aguantó ser usada más de la mitad de los días que estuve en la universidad.

Conocí personas maravillosas y jamás me olvidaré de ustedes...

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Generalidades	1
1.2	Motivación	1
1.3	Objetivo General	2
1.4	Objetivos Específicos	2
1.5	Alcances	3
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Minería del cobre en Chile	4
2.1.1	Procesos mineros	5
2.1.2	Fuentes de energía y consumos energéticos actuales en MC	9
2.2	Conceptos básicos de proyectos de eficiencia energética	11
2.2.1	Eficiencia energética (EE)	11
2.2.2	Medidas de eficiencia energética (MEE)	11
2.2.3	Oportunidades de eficiencia energética	12
2.2.4	Indicadores energéticos	12
2.2.5	Indicadores de factibilidad económica de un proyecto de EE	12
2.2.6	Opciones de financiamiento para proyectos de EE	13
3	METODOLOGÍA	14
4	RESULTADOS	15
4.1	Análisis de sistemas energéticamente relevantes en la minería chilena	15
4.1.1	Procesos energéticamente relevantes: Perspectiva global	15
4.1.2	Sistemas energéticamente relevantes	16
4.2	Oportunidades de EE en minería	29
4.2.1	Oportunidades en procesos de conminución de material	29
4.2.2	Oportunidades en proceso de electro-refinación	32
4.2.3	Oportunidades en procesos de electro-obtención	33
4.2.4	Oportunidades en procesos de transporte con camiones de alto tonelaje	34
4.3	Metodología para análisis de oportunidades y medidas de EE	36
4.3.1	Análisis del consumo energético	36
4.3.2	Análisis del uso energético	38
4.3.3	Análisis de oportunidades y medidas de EE	39
4.4	Metodología para construcción del proyecto de inversión en EE (PIEE)	42
4.4.1	Seleccionar subconjunto de MEE que integran el PíEE	42
4.4.2	Determinar inversiones del PíEE	42
4.4.3	Evaluar impacto productivo del PíEE	43
4.4.4	Evaluar estructura de costo de producción del PíEE	43
4.4.5	Realizar evaluación económica del PíEE	43
4.4.6	Determinar modalidad de financiamiento del PíEE	44
4.5	Manual de Eficiencia Energética para minería	45
4.5.1	Análisis del consumo energético	45
4.5.2	Análisis del uso energético	45
4.5.3	Análisis de oportunidades y medidas de EE	45
4.5.4	Construcción del proyecto de inversión en EE	45
4.6	Ejemplo: Gestión de carga en camiones de alto tonelaje	51
4.6.1	Caso real: División Gabriela Mistral (Mina Gaby)	56

5	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	57
5.1	Discusión	57
5.2	Conclusiones.....	59
6	Bibliografía	61
7	ANEXOS	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Cantidad de faenas mineras por región	5
Tabla 4.1: Descripción de unidades de consumo unitario de energía por material procesado	15
Tabla 4.2: Clasificación de tecnologías de fusión	18
Tabla 4.3: Formulario para realizar identificación de fuentes de energía	46
Tabla 4.4: Formulario para realizar identificación de gastos monetarios	46
Tabla 4.5: Formulario para los indicadores determinados (TMF: Tonelada métrica fina)	46
Tabla 4.6: Formulario de identificación de SER	47
Tabla 4.7: Principales usos energéticos en minería.....	48
Tabla 4.8: Formulario de equipos energéticamente relevantes	48
Tabla 4.9: Determinación de ahorro energético y monetario de cada medida de EE....	48
Tabla 4.10: Formulario estándar para desarrollo de valoración económica de cada MEE	48
Tabla 4.11: Formulario de comparación de MEE según indicadores económicos	49
Tabla 4.12: Determinación de ahorros energéticos y monetarios de cada MEE integrada en el PíEE	49
Tabla 4.13: Formulario para flujos de caja de la situación sin proyecto de EE.....	49
Tabla 4.14: Formulario para flujos de caja de la situación con proyecto de EE.....	50
Tabla 4.15: Formulario para flujos de caja marginal del proyecto de EE	50
Tabla 4.16: Resultados para Modelo 785C con resistencia total 10%	53
Tabla 4.17: Resultados para Modelo 785C con resistencia total 15%	53
Tabla 4.18: Resultados para Modelo 789D con resistencia total 10%	53
Tabla 4.19: Resultados para Modelo 789D con resistencia total 15%	54
Tabla 4.20: Costos anuales por modelo de camión para porcentajes de carga	55
Tabla 4.21: Ahorro o aumento de costos anuales por kilo-tonelada de mineral transportado y por kilómetro de distancia de acarreo por modelo de camión para porcentajes de carga.....	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Evolución de producción de cobre y consumo energético	2
Figura 2.1: Consumo energético de los sectores económicos del país	4
Figura 2.2: Consumos energéticos dentro del sector industria y minería	4
Figura 2.3: Diagrama de flujo de procesos de producción de cobre según clasificación de COCHILCO	6
Figura 2.4: Distribución del consumo de combustibles en minería del cobre	9
Figura 2.5: Consumo nacional de energía en la minería del cobre.....	10
Figura 2.6: Consumo energético base a combustible por proceso minero	10
Figura 2.7: Consumo energético base a electricidad por proceso minero	11
Figura 4.1: Consumo unitario de combustibles por tonelada de mineral procesado	15
Figura 4.2: Consumo unitario de electricidad por tonelada de mineral procesado	16
Figura 4.3: Clasificación propuesta de sistemas energéticamente relevantes en la minería	17
Figura 4.4: Diagrama Horno Flash Outotec	19
Figura 4.5: PFD de Horno Flash Outotec.....	20
Figura 4.6: Diagrama Horno Flash Inco	20
Figura 4.7: Diagrama convertidor Noranda	21
Figura 4.8: Diagrama Horno Convertidor Teniente	21
Figura 4.9: Diagrama Horno de Reverbero	22
Figura 4.10: Diagrama horno rotatorio de refinación.....	23
Figura 4.11: Curvas características de una bomba hidráulica típica.....	24
Figura 4.12: Diagrama chancador giratorio	25
Figura 4.13: Diagrama de molino SAG	26
Figura 4.14: Diagrama de flujo de proceso de la etapa de conminución	27
Figura 4.15: Diagrama de sistema de celdas de electro-refinación	27
Figura 4.16: Diagrama de celda de electro-obtención	28
Figura 4.17: Porcentaje de fragmentos con un diámetro mayor a 0,1m en tronadura según la carga por perforación	30
Figura 4.18: Efecto de la granulometría en la recuperación de cobre en el concentrado	31
Figura 4.19: Efecto de la granulometría en la concentración de cobre en los residuos.	31
Figura 4.20: Diagrama del molino de rodillos de alta presión	32
Figura 4.21: Diagrama de flujo de procesos de metodología para análisis de oportunidades y medidas de EE	36
Figura 4.22: Diagrama de flujo de procesos de análisis del consumo energético	36
Figura 4.23: Diagrama de flujo de procesos de análisis del uso energético	38
Figura 4.24: Diagrama de flujo de procesos de análisis de oportunidades y medidas de EE.....	39
Figura 4.25: Diagrama de flujo de proceso de metodología para construcción del proyecto de inversión	42
Figura 4.26: Rendimiento en subida de pendiente/velocidad/fuerza de tracción.....	54

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

La eficiencia energética (EE) es un conjunto de acciones que permiten reducir la cantidad de energía consumida en los procesos o servicios finales de una entidad. En otras palabras, consiste en hacer más con la misma cantidad de energía o hacer lo mismo con menos energía.

La realización de EE genera diversos beneficios en los ámbitos financieros, ambientales y sociales (país). A continuación se presentan algunos de estos beneficios [1]:

- Financieros:
 - Reduce los gastos de energía en los hogares.
 - Reduce el consumo de combustible.
 - Mejora la competitividad de las empresas, al reducir los costos de producción y operación.
- Ambientales:
 - Disminuye el consumo de recursos naturales.
 - Reduce el daño ambiental y la contaminación.
- Sociales:
 - Disminuye la vulnerabilidad del país por dependencia de fuentes energéticas externas.
 - Genera empleo y oportunidades de aprendizaje tecnológico.
 - Mejora la imagen del país en el exterior.

Es por esto que las empresas chilenas deben ver a la EE como un socio que viene a aplicar valor dentro de la compañía, siendo un aporte en el control y disminución de los costos energéticos.

En estos últimos años nuestro país ha estado afectado por sequías, lo que ha llevado a una falta de generación hidráulica y a una mayor dependencia a los combustibles fósiles, aumentando la contaminación. La Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE) menciona que la energía más barata es la que no se consume, por lo tanto es la que no se genera. Esto conlleva a una disminución de la cantidad de proyectos energéticos requeridos por el país.

1.2 Motivación

Año a año el consumo de energía en la minería crece de manera significativa mientras que la producción de cobre fino se mantiene prácticamente constante o aumenta en menor proporción que la energía [2]. Un indicador que permite analizar la tendencia del consumo de energía en la producción de minería es el coeficiente unitario de energía, este se puede aproximar como el consumo de energía total dividido por la producción anual de cobre. Dada la información de la Figura 1.1, la tendencia de este indicador es aumentar cada año, esto se debe al aumento de la dureza del mineral, aumento de las distancias de acarreo y a una declinación de las leyes de mineral. Por lo tanto, para

conseguir la misma cantidad de mineral se requiere procesar una mayor cantidad de roca, lo que aumenta el consumo de energía.

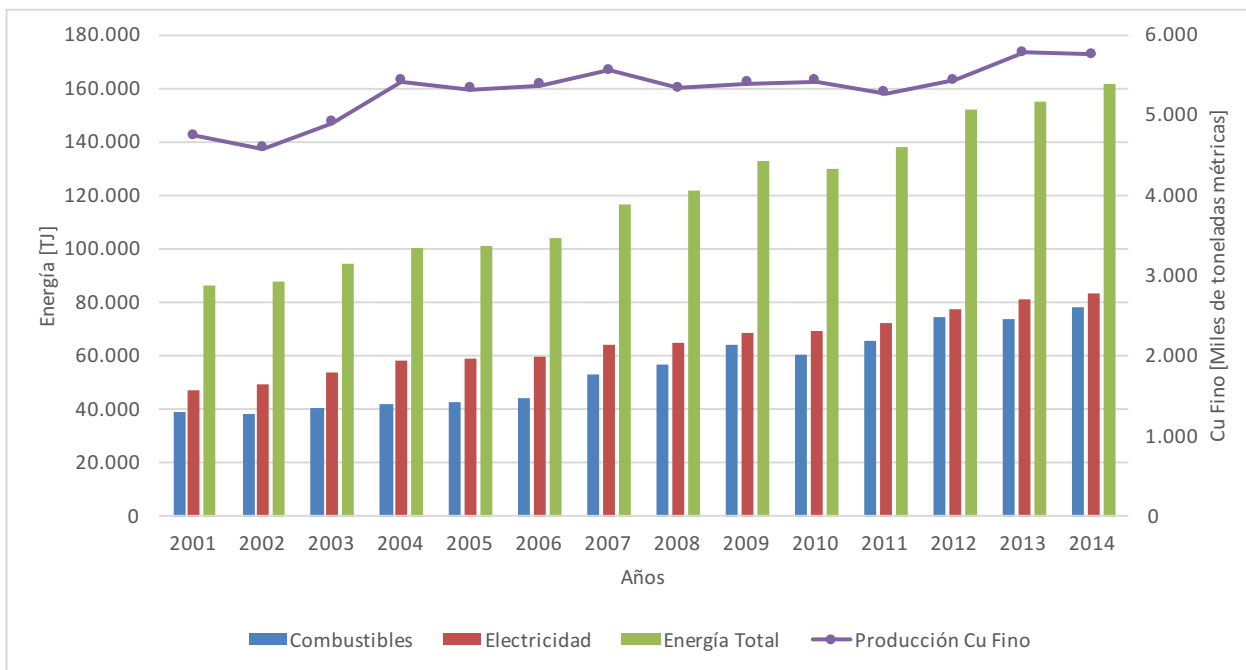


Figura 1.1: Evolución de producción de cobre y consumo energético
Fuente: Elaboración propia adaptado de [2] y [3]

Desde el punto de vista del mercado energético los costos de la energía son más altos que hace unos años atrás, además el 70% de los combustibles fósiles son importados desde el extranjero; produciendo que cualquier contingencia internacional origine un alza en estos tipos de combustibles, lo cual produce un aumento del precio de la energía a nivel nacional y; finalmente, un mayor costo de producción y operación.

Los países desarrollados han logrado desacoplar la curva de consumo de energía y de crecimiento económico, la EE fue y es una de las principales medidas utilizadas para haber logrado este objetivo. Es necesario que Chile logre este desacople para estar a la altura de los demás países desarrollados. Siendo la minería uno de los mayores consumidores de energía en Chile, según el ministerio de energía, es importante buscar medidas de EE en faenas mineras chilenas; para así utilizar la energía de manera responsable.

1.3 Objetivo General

El objetivo general es diseñar un manual de eficiencia energética para minería chilena, incluyendo mediana y gran minería.

1.4 Objetivos Específicos

- i. Desarrollar una caracterización de sistemas de consumo de energía (SCE) e identificar sistemas energéticamente relevantes (SER).
- ii. Identificar oportunidades de eficiencia energética aplicables a la minería chilena, incluyendo tecnologías blandas (buenas prácticas) y tecnologías duras.

- iii. Desarrollar una metodología para análisis de oportunidades y medidas de eficiencia energética (O&MEE).
- iv. Desarrollar una metodología para construcción del proyecto de inversión en eficiencia energética (PIEE).
- v. Desarrollar un ejemplo de O&MM en minería chilena.

1.5 Alcances

- Desarrollo de un texto guía de ingeniería basado en datos de compañías mineras chilenas e información de mercado sobre tecnologías y valor de la energía..
- Manual enfocado en la minería del cobre, ya que corresponde a la principal en la minería chilena.
- El manual de eficiencia energética para minería se compone de:
 - Metodología para análisis de oportunidades y formulación de medidas de eficiencia energética.
 - Metodología para construcción del PIEE a partir de las MEE.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Minería del cobre en Chile

La minería es un sector económico que representa aproximadamente el 11% del producto interno bruto (PIB) del país al año 2013, siendo uno de los más importantes junto a los sectores de servicios financieros y empresariales (19%) [4].

El consumo energético del sector industria y minería es cercano a un 36% del país (Figura 2.1), donde la minería del cobre resulta cercano a un 32% del sector (Figura 2.2), consumiendo alrededor del 12% total de energía del país [5].

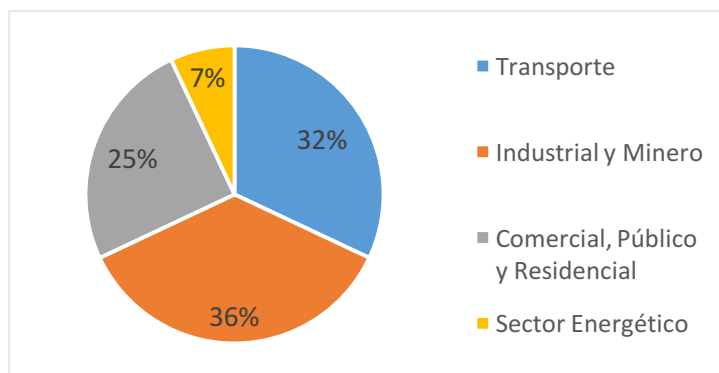


Figura 2.1: Consumo energético de los sectores económicos del país
Fuente: Elaboración propia adaptado de [5]

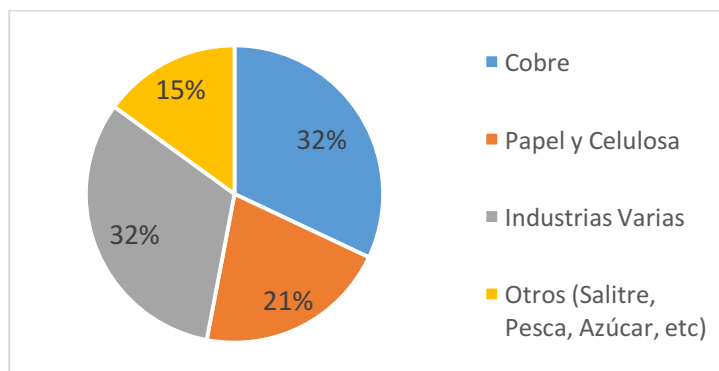


Figura 2.2: Consumos energéticos dentro del sector industria y minería
Fuente: Elaboración propia adaptado de [5]

Según información entregada por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) [6]-[10], existen 6.053 faenas mineras las cuales se encuentran diferenciadas por región en la Tabla 2.1. Al hablar de faena minera no sólo se refiere a minas rajo abierto o minas subterráneas, sino que incluye las plantas de procesamiento de mineral, plantas de limpieza de gases, fundiciones, entre otras.

La mayoría de las faenas trabajan con minerales de cobre, también se encuentran de oro, plata, molibdeno, entre otros. De las 6.053 faenas identificadas no todas se encuentran activas, algunas están paralizadas temporalmente, abandonadas y otras en estado irregular (se refiere a pequeña minería y se encuentran en proceso de regulación). En el año 2014 el 97,6% de la producción de cobre fino nacional fue generado por las 44

empresas productoras de cobre más importantes del país, considerando fundiciones y refinerías existentes [2].

Tabla 2.1: Cantidad de faenas mineras por región

Región	Nombre	Número de Faenas
XV	Arica y Parinacota [6]	28
I	Tarapacá [6]	77
II	Antofagasta [7]	563
III	Atacama [7]	2.397
IV	Coquimbo [8]	1.289
V	Valparaíso [9]	905
XIII	Metropolitana de Santiago [9]	217
VI	Libertador General Bernardo O'Higgins [9]	297
VII	Del Maule [10]	26
VIII	Del Biobío [10]	198
IX	De La Araucanía [10]	3
XIV	De Los Ríos [10]	14
XI	Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo [10]	14
XII	De Magallanes y de la Antártica Chilena [10]	25
	Total	6.053

Fuente: Elaboración propia adaptado de [6] - [10]

Dado todo lo anterior, el sector de la industria minera, principalmente del cobre, es considerado el más importante al momento de hablar de producción chilena.

2.1.1 Procesos mineros

2.1.1.1 Clasificación de procesos

Para un mejor entendimiento de las estadísticas de consumo energético presentadas en este informe, a continuación se explica la clasificación de procesos utilizada por COCHILCO [2]; la cual consiste en una agrupación de los procesos que se explican más adelante. Además, en la Figura 2.3 se muestra el diagrama de flujo de procesos.

- **Mina rajo:** Se entiende como el conjunto de procesos unitarios necesarios para la extracción del mineral desde una faena minera a rajo abierto para su posterior procesamiento y recuperación del mineral. Los principales procesos son: perforación y tronadura, transporte, carguío y chancado primario.
- **Mina subterránea:** Se entiende como el conjunto de procesos unitarios necesarios para la extracción de mineral desde una faena minera subterránea, utilizando cualquier método de explotación subterráneo, para su posterior procesamiento y recuperación del mineral. Los principales procesos son: perforación y tronadura, transporte, carguío y chancado primario.

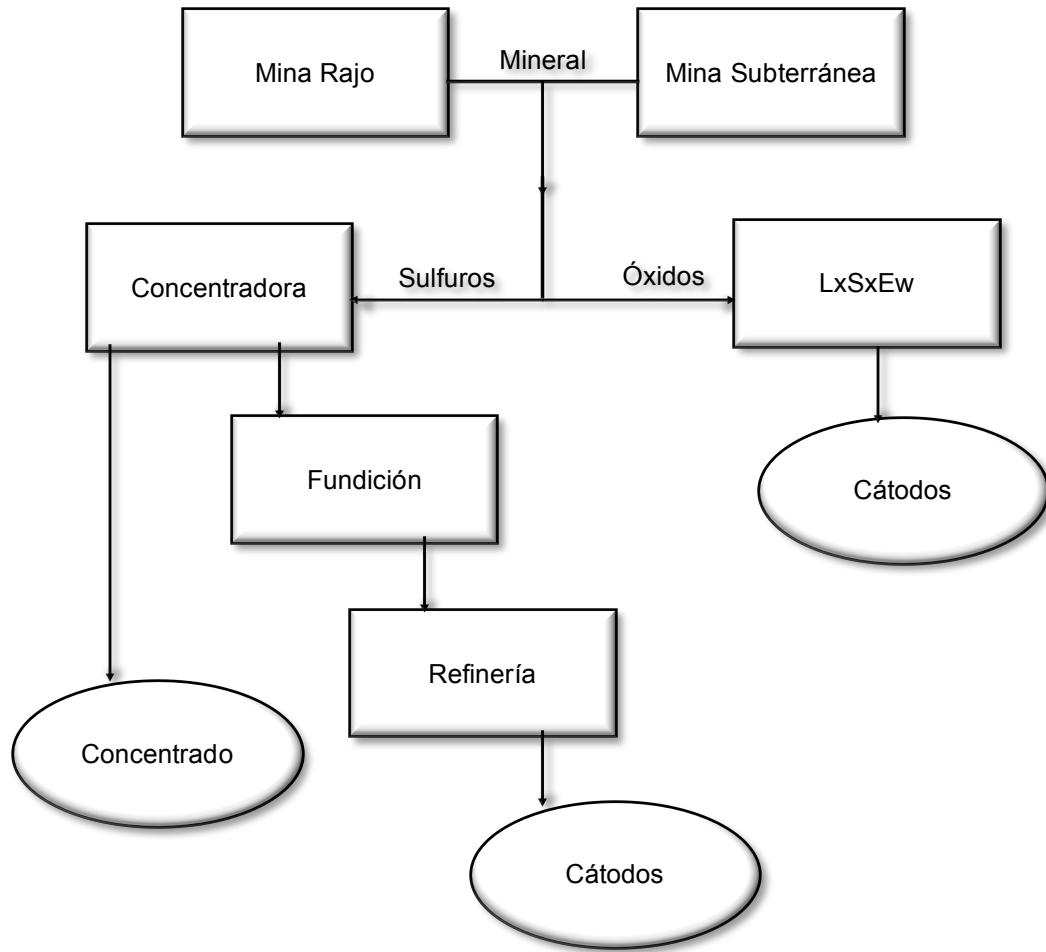


Figura 2.3: Diagrama de flujo de procesos de producción de cobre según clasificación de COCHILCO
 Fuente: Elaboración propia adaptado de [2]

- **Concentradora:** Considera todos los procesos unitarios posteriores al chancado primario involucrados en la producción de concentrado de cobre. Los principales procesos son: plantas de chancado, molienda tradicional, molienda SAG, concentración (flotación) y filtrado.
- **LxSxEw:** Considera los procesos unitarios hidrometalúrgicos involucrados en la producción de cátodos electro-obtenidos. Los principales procesos son: aglomeración, lixiviación ROM, lixiviación HEAP, extracción por solventes y electro-obtención.
- **Fundición:** Considera todos los procesos unitarios involucrados en la producción de cobre blíster a partir de concentrados de cobre. Los principales procesos son: secado, fusión (hornos), conversión y piro-refinación (refino y moldeo).
- **Refinería:** Corresponde al proceso físico de electrólisis con el cual se obtienen cátodos de cobre de alta pureza.
- **Servicios:** Corresponde a aquellas actividades que no se encuentran involucradas en los procesos productivos unitarios de la cadena de valor principal, pero que son

necesarias para el desarrollo de la minería y poseen consumo energético de importancia como lo son: talleres de mantenimiento, campamentos, impulsión y desalación de agua.

2.1.1.2 Vías de producción según el tipo de mineral de Cobre

Las vías o métodos de producción de cobre varían según el tipo de mineral del yacimiento, en Chile el cobre se encuentra en forma de óxidos y sulfuros. Ambos métodos comienzan con la extracción, que puede ser a rajo abierto o subterránea, luego pasan a una etapa de chancado primario, a partir de las siguientes etapas se diferencian los procesos.

El procesamiento de los óxidos continúa con el proceso de aglomeración, lixiviación en pilas, extracción por solventes y por último la electro-obtención, produciendo cátodos de cobre.

En cambio, los sulfuros siguen con una etapa de molienda, flotación, espesamiento, filtración, fundición y finalmente electro-refinación, generando cátodos de cobre.

A continuación se explican, de forma general, las etapas de cada una de las líneas de producción de cobre [11]:

- **Extracción:** El objetivo de este proceso es extraer el mineral con cobre de la mina, a rajo abierto o subterránea, para luego enviarlo a la planta para ser procesado. La secuencia de subprocesos para lograr la extracción consiste en perforar, tronar, cargar y transportar.
- **Chancado Primario:** Esta etapa recibe el material extraído de la mina, el cual presenta granulometrías muy variadas, menores a 1 milímetro hasta sobre 1 metro de diámetro. El objetivo es ser la primera etapa de reducción de tamaño del mineral, dejando un diámetro promedio de mineral entre 10 a 20 centímetros, para ello se utilizan grandes equipos eléctricos llamados chancadores.

Como se mencionó anteriormente, estas rutas de proceso son comunes para los minerales oxidados y los minerales sulfurados. A continuación, se explican primero las etapas del procesamiento de óxidos:

- **Aglomeración:** Es una etapa previa a la lixiviación en la cual se prepara el material mineralizado garantizando una buena permeabilidad. La aglomeración permite la unión de varias partículas finas a otras de mayor tamaño, las cuales actúan como núcleos.
- **Lixiviación:** Es un proceso que permite obtener el cobre de los minerales aplicando ácido sulfúrico y agua, esto debido a que los minerales oxidados son sensibles al ataque de soluciones ácidas. La lixiviación se desarrolla en periodos de 45 a 60 días.

- Extracción por solventes: Este proceso tiene la finalidad de traspasar el cobre proveniente de las soluciones lixiviadas a una solución de electrolito puro y concentrado, lo cual permite posteriormente realizar la electro-obtención.
- Electro-obtención: El objetivo es recuperar el metal desde una solución de lixiviación acondicionada, depositándolo en un cátodo gracias a un proceso de electrólisis. Para ello es necesario hacer circular una corriente eléctrica continua de baja intensidad entre un ánodo y un cátodo. Finalmente el cobre se concentra formando cátodos de alta pureza.

El procesamiento de los sulfurados continúa con los siguientes procesos:

- Molienda: Se continúa con la disminución del tamaño de las partículas para obtener un producto definitivo, para su comercialización o para la posterior etapa de separación de componentes valiosos de los no valiosos. Se pueden alcanzar tamaños tan pequeños como 20 micras. Se utilizan grandes equipos eléctricos denominados molinos, existen variadas tecnologías y la elección de esta depende del tamaño de material a procesar.
- Flotación: El objetivo principal es separar selectivamente el mineral útil del 90% de la ganga aproximadamente. Para ello se utilizan reactivos para dar propiedad hidrofóbica al mineral valioso y propiedades hidrofílica al mineral no valioso, luego se inyecta aire a la celda de flotación para realizar la separación, en donde el mineral valioso se concentra en la parte superior de la celda y el no valioso en la inferior.
- Espesamiento: El objetivo de estas etapas es eliminar toda el agua que sea posible de la pulpa, en otras palabras, incrementar la densidad de la pulpa hasta un 65% en sólidos.
- Filtración: Se busca eliminar gran parte del resto del agua que queda en la pulpa luego del espesamiento, llegando a niveles de humedad del orden entre 8% a 10%. Consiste en la separación de partículas sólidas contenidas en un fluido pasando a través de un medio filtrante.
- Fundición: El objetivo es que el concentrado pase de estado sólido a líquido para poder separar el cobre de los otros metales presentes. El concentrado es sometido a altas temperaturas, 1.200°C. Se utilizan típicamente hornos de reverbero, horno flash o el convertidor modificado teniente.
- Electro-refinación: En esta etapa se transforman los ánodos producidos en el proceso de fundición a cátodos de cobre electrolítico de alta pureza. Se realiza en celdas electrolíticas en donde los ánodos (planchas de cobre obtenidas de la fundición) se colocan intercaladamente con cátodos (plancha muy delgada de cobre puro). Se hace pasar corriente eléctrica por una solución de ácido sulfúrico y agua, el ion sulfato de la solución comienza a atacar el ánodo de cobre formando una solución de sulfato de cobre denominado electrolito. Todo esto ocurre en un proceso continuo de 20 días.

2.1.2 Fuentes de energía y consumos energéticos actuales en MC

Las principales fuentes de energía para realizar los procesos mineros son los combustibles y la electricidad. Hay que destacar que se han implementado proyectos termosolares y solares-fotovoltaicos en mineras del norte de Chile, con el fin de sustituir el consumo energético de combustibles fósiles y generar energía eléctrica para autoconsumo respectivamente; sin embargo no existe información estadística de la participación energética de este tipo de fuentes. Un ejemplo es la planta termosolar de la minera El Tesoro perteneciente a Antofagasta Minerals [12].

Los combustibles se utilizan para los procesos de fundición, hornos, calderas para calentar agua y para sistemas eléctricos de respaldo. Son considerados el carbón, gasolina, diésel, enap 6, kerosene, gas licuado, leña, butano, nafta y propano. El combustible más utilizado el año 2014 [13] corresponde al diésel con un 85,2% de la energía utilizada (Figura 2.4), éste se ocupa principalmente en el proceso de extracción debido a los camiones de transporte de mineral y transporte de lastre. El enap 6 y el gas natural, los cuales son utilizados principalmente para generación de electricidad en servicios varios, siguen al diésel con un 7,5% y un 6,4% respectivamente.

La electricidad se utiliza para el funcionamiento de máquinas de chancado, molienda y bombeo, además para el movimiento de correas transportadoras y herramientas. Se considera la energía eléctrica consumida del Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) y del Sistema Interconectado Central (SIC).

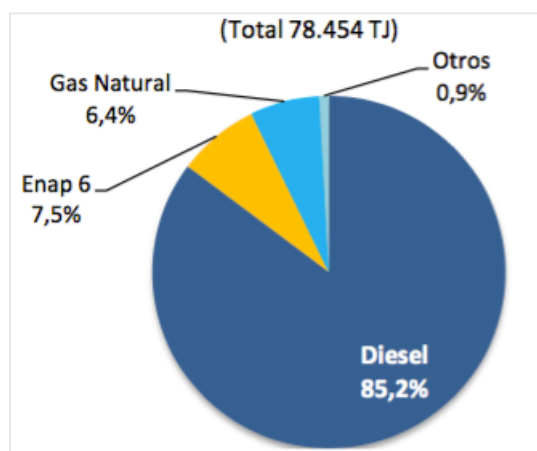


Figura 2.4: Distribución del consumo de combustibles en minería del cobre
Fuente: Comisión chilena del cobre [13]

En la Figura 2.5 se presenta el total de energía consumida entre los años 2001 y 2014, además se identifica la participación de los combustibles y de electricidad. Se aprecia que para los últimos años (2010 a 2014) la participación ha sido prácticamente la misma, con un leve incremento de la energía eléctrica [13].

Cada proceso minero no consume el mismo tipo de energía ni la misma cantidad, por lo tanto, es importante conocer el consumo que tiene cada uno de ellos para energía en base a combustibles y a electricidad. En la Figura 2.6 se presenta el consumo anual de

energía en base a combustible por proceso y en la Figura 2.7 el consumo anual de energía en base a electricidad por proceso.

Se tiene que el mayor consumidor de combustible es el proceso de mina con más del 50%, el cual se ha duplicado entre el año 2001 y el año 2014. El menor consumo de combustible se lleva a cabo en el proceso de concentradora (incluye las etapas de chancado, molienda, flotación, espesamiento y filtrado). En cambio, el consumo eléctrico es mayor para el proceso de concentradora y menor para mina.

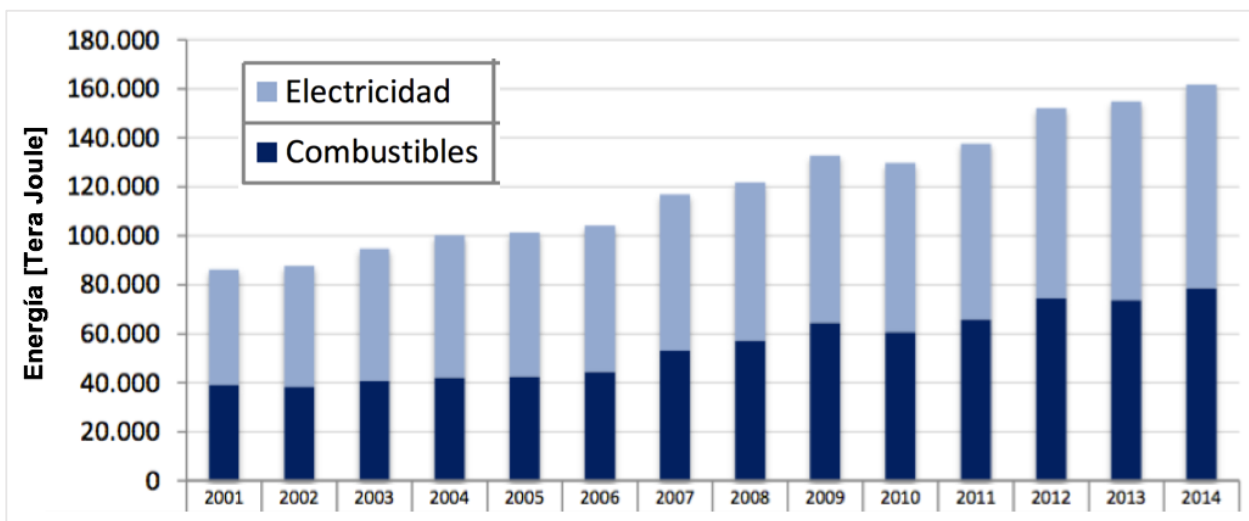


Figura 2.5: Consumo nacional de energía en la minería del cobre
Fuente: Comisión chilena del cobre [13]

Los aumentos de consumo de energía en la minería del cobre se debe a un envejecimiento de yacimientos, lo que significa una disminución de leyes, mayor dureza del mineral y mayores distancias de acarreo. El argumento anterior implica un aumento en la intensidad de uso de energía, esto quiere decir que se está requiriendo cada vez más energía para seguir explotando la misma cantidad de material.

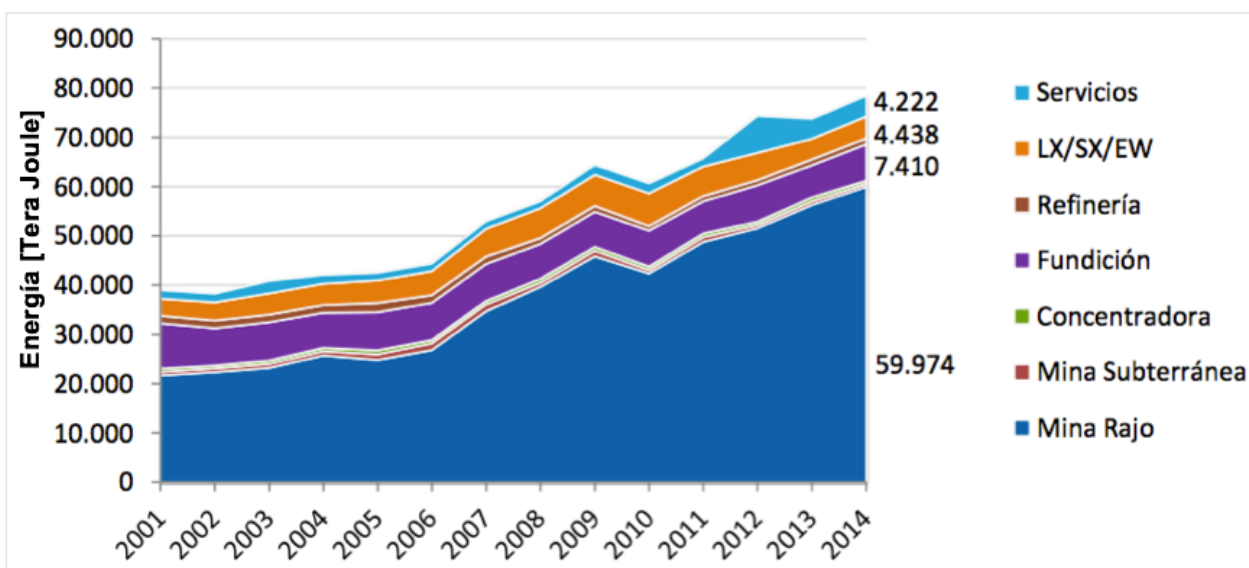


Figura 2.6: Consumo energético base a combustible por proceso minero
Fuente: Comisión chilena del cobre [13]

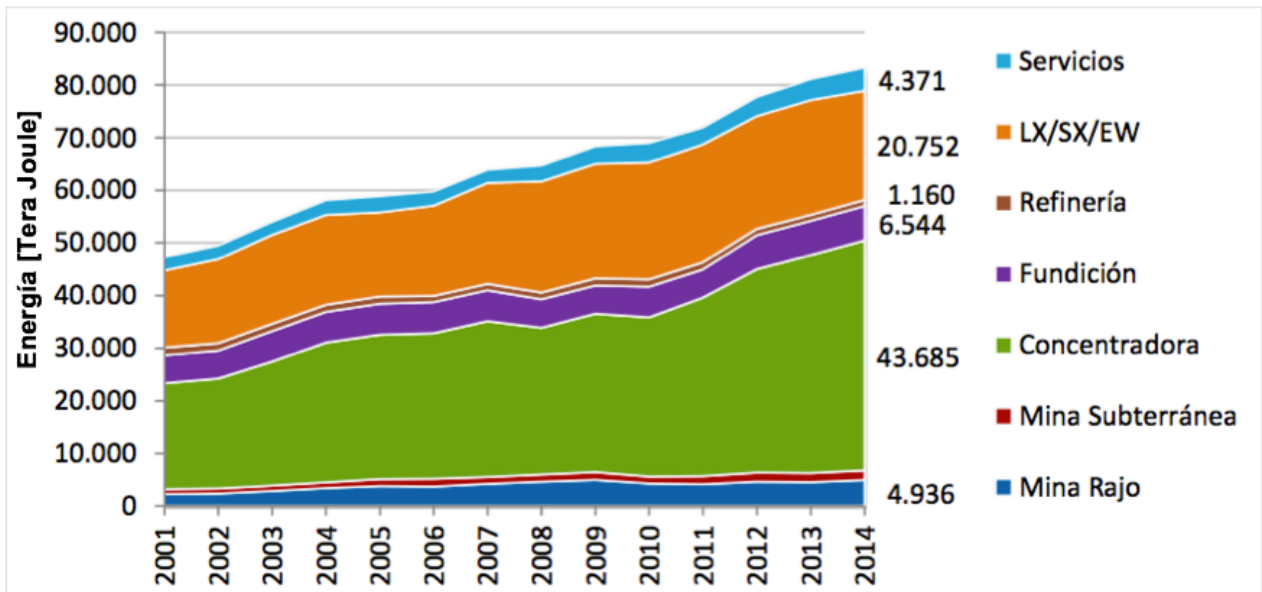


Figura 2.7: Consumo energético base a electricidad por proceso minero
Fuente: Comisión chilena del cobre [13]

2.2 Conceptos básicos de proyectos de eficiencia energética

2.2.1 Eficiencia energética (EE)

La EE es la optimización de la relación entre los productos o servicios finales obtenidos y la cantidad de energía utilizada en su producción, también se puede entender como acciones que apuntan a reducir el consumo de energía sin sacrificar el confort o la actividad económica a la que sirve.

Entre los beneficios que trae la realización de EE en las industrias mineras, según la Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE), se encuentra un menor consumo de energía, por lo tanto un menor gasto variable y menos consumos de otros recursos ligados al abastecimiento energético; flujos de caja menos sensibles a fluctuaciones en los precios de energía al ser un sistema menos dependientes de los combustibles y de la electricidad; y mayor confiabilidad en los equipos (maquinaria), debido a que una buena implementación de medidas de eficiencia energética requiere de mantenimiento y control continuo [1].

2.2.2 Medidas de eficiencia energética (MEE)

Las MEE corresponden a acciones destinadas a optimizar el uso de los recursos energéticos utilizados en la organización. Estas se distinguen en mejoras operacionales (gestión de actividades), recambios tecnológicos (equipos modernos más eficientes), innovación en los procesos y cambio cultural (educación en EE) [14].

2.2.3 Oportunidades de eficiencia energética

Las oportunidades de eficiencia energética consisten en desafíos o problemas existentes en las empresas relacionados con el consumo o desperdicio de energía. Algunos problemas existentes en la industria minera actualmente son selección inadecuada de equipos, uso de dispositivos o maquinaria con baja eficiencia, pérdidas por mala planificación de los procesos productivos, y pérdidas en la transmisión y acumulación de energía [14].

2.2.4 Indicadores energéticos

Los indicadores energéticos tienen el objetivo de ser una base de información para poder comparar los consumos de energía entre periodos o entre distintos proyectos de la misma naturaleza. Los más utilizados son [1]:

- Consumo específico: Permite conocer la cantidad de energía que se requiere por cada unidad productiva por una empresa, corresponde a la forma más común de establecer la eficiencia energética de una empresa, permitiendo compararla con otras empresas.
- Rendimiento: Se estima a nivel de procesos, permite conocer la EE específica de ciertas instalaciones. Al ser comparado con instalaciones similares permite conocer si la EE esta sobre o debajo de lo normal.
- Intensidad energética: Se estima a nivel de la empresa completa, permite conocer la eficiencia global de producción en términos de unidad energética consumida por unidad monetaria de ventas.

2.2.5 Indicadores de factibilidad económica de un proyecto de EE

Los indicadores típicos de factibilidad económica en proyectos de inversión son de utilidad para proyectos de EE, a continuación se describen brevemente ventajas y desventajas sobre los indicadores típicos (PRI, VAN y TIR). Además se presentan otros indicadores útiles para proyectos de EE [1].

- Periodo de recuperación de la inversión (PRI): Es un buen indicador de riesgo indicando la mayor o menor rapidez con que se recupera el capital invertido. Es un indicador inadecuado para considerar beneficios en el largo plazo porque no considera ganancias del capital que se recupera posterior al periodo de retorno. No toma en cuenta la vida económica de los activos físicos, como tampoco el valor residual de los mismos.
- Valor actual neto (VAN): Es el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. Considera flujos monetarios descontados, el valor temporal del dinero y los flujos monetarios durante la vida del proyecto. Requiere fijar a priori un determinado valor para la tasa de descuento o costo de oportunidad.

- Tasa interna de retorno (TIR): Es la tasa de descuento con la que el VAN es igual a cero. Considera flujos monetarios descontados. Es independiente de la tasa de descuento, pero no se presta bien para flujos irregulares.
- Anualidad (costo anual de la medida de mejora de le EE): La inversión se divide en pagos nominales iguales sobre su vida útil, considerando intereses. Los costos en el caso base se comparan con los costos de alternativas de mejora. La solución más económica es aquella con los costos totales más bajos. Considera los costos de capital, costos de consumo de energía y costos de operación y mantenimiento.
- Costo de ahorrar energía (CAE): Representa el costo de evitar el consumir una unidad de energía, mediante la implementación de una medida de mejora de EE. Entrega un número simple que puede ser comparado con el precio de la energía vigente en la empresa o institución que se está analizando. Considera la inversión adicional incluyendo el costo anual de capital invertido y la energía anual que se puede ahorrar con la implementación del proyecto de EE. Se desprecian los costos de operación y mantenimiento. Por lo mismo sirve para evaluar proyectos simples de EE.
- Costo de la inversión por cantidad de energía ahorrada: Para priorizar entre proyectos de EE se puede recurrir a un indicador mixto, este es el cociente del costo de la inversión (en \$) por cantidad de energía ahorrada (kWh), que tiene el mérito de ser independiente de las fluctuaciones que pueda experimentar el precio de la energía durante la vida del proyecto.

2.2.6 Opciones de financiamiento para proyectos de EE

Las opciones que tiene una industria para financiar las medidas de EE son [1]:

- Financiamiento con recursos propios.
- Financiamiento por parte de una Empresa de Servicios Energéticos (ESCO por su sigla en inglés).
- Crédito de una institución financiera que ofrece líneas especiales para inversiones en EE.
- “Leasing” para equipos.
- Líneas de crédito orientadas a inversiones tecnológicas que pueden ser utilizadas para financiar medidas de EE.

Las ESCOs suministran el servicio completo para un proyecto de EE (ingeniería, suministro, construcción, montaje y puesta en marcha), el cual puede incluir el financiamiento. Su remuneración proviene de los ahorros de energía que resultan del proyecto.

3 METODOLOGÍA

A continuación se presenta la metodología para desarrollar los objetivos del presente proyecto.

- i. Caracterizar los sistemas de consumo de energía en la minería:
 - a. Revisar antecedentes y el estado del arte de los procesos mineros, tecnologías utilizadas y consumos energéticos.
 - b. Organizar los sistemas de consumo de energía según tipo de fuente energética (combustible o electricidad). Luego subdividir los sistemas según tipo de funcionamiento.
 - c. Determinar sistemas energéticamente relevantes con sus principales equipos.
- ii. Identificar oportunidades de EE:
 - a. Revisar bibliografía de casos prácticos de EE en la minería en el mundo.
 - b. Identificar mejoras operacionales en los procesos mineros.
 - c. Identificar opciones de innovación para disminuir el consumo de energía.
 - d. Identificar opciones de cambio tecnológico en equipos energéticamente relevantes.
- iii. Desarrollar metodología de oportunidades y MEE:
 - a. Revisar documentos de EE en ámbito minero e industrial.
 - b. Identificar acciones comunes entre manuales y guías de la AChEE de diferentes sectores (edificación, hospitales, transporte, industria y minería) junto a manuales internacionales, para enfocar estas acciones en la realización de una auditoría en minería.
 - c. Desarrollar metodología, explicando cada paso para poder realizar la identificación de oportunidades y MEE.
- iv. Desarrollar metodología de construcción de proyecto de inversión:
 - a. Revisar documentos de EE en ámbito industrial y minero.
 - b. Determinar actividades para integrar proyecto de inversión.
 - c. Desarrollar metodología, explicando cada paso para poder realizar el construcción del proyecto de inversión.
- v. Desarrollar manual de eficiencia energética para minería:
 - a. Desarrollar formularios de metodología de oportunidades y MEE.
 - b. Desarrollar formularios de metodología de construcción de proyecto de inversión.
 - c. Revisar oportunidades de financiamiento.

4 RESULTADOS

4.1 Análisis de sistemas energéticamente relevantes en la minería chilena

4.1.1 Procesos energéticamente relevantes: Perspectiva global

Para realizar un primer análisis se identifican los procesos energéticamente relevantes en la minería chilena, para luego indagar con mayor profundidad y determinar los sistemas energéticamente relevantes (SER) en cada uno de ellos. Según los datos presentados en el capítulo 2.1.2 estos corresponden a mina rajo, concentración y LxSxEw, sin embargo estas estadísticas mencionan el consumo a nivel nacional y no discriminan por la cantidad y tipo de faena.

Un mejor indicador para determinar los procesos energéticamente relevantes es el consumo unitario de combustible por tonelada de mineral procesado (Figura 4.1) y el consumo unitario de electricidad por tonelada de mineral procesado (Figura 4.2). Debido a que el contenido de cobre del mineral va aumentando a través de los procesos, cada uno tiene una unidad distinta. En la Tabla 4.1 se presenta la unidad por cada proceso y su respectiva descripción.

Tabla 4.1: Descripción de unidades de consumo unitario de energía por material procesado

Proceso	Unidad	Descripción
Mina rajo y subterránea	TM mineral extraído	Toneladas de mineral extraídos desde mina rajo o mina subterránea, no considera material estéril.
Concentradora	TM mineral procesado	Toneladas métricas de mineral que es procesado en plantas concentradoras.
LxSxEw	TM mineral lixiviado	Tonelada métrica de mineral lixiviado. Considera lixiviación HEAP y ROM, extracción por solventes y electro-obtención.
Fundición	TM concentrado procesado	Tonelada métrica de concentrado procesado en fundición.

Fuente: Elaboración propia adaptado de [2]

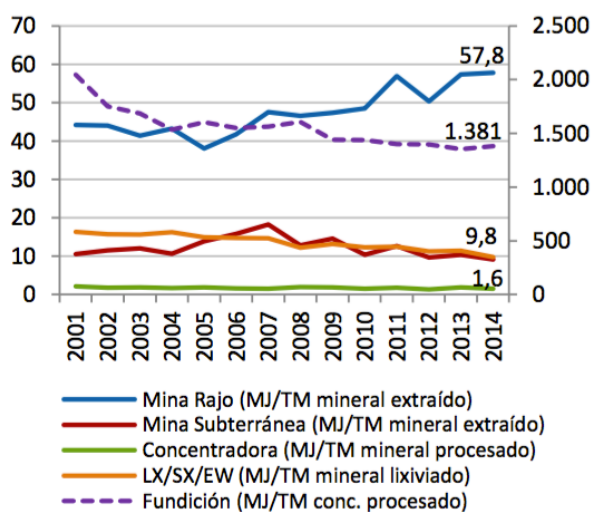


Figura 4.1: Consumo unitario de combustibles por tonelada de mineral procesado

Fuente: COCHILCO [13]

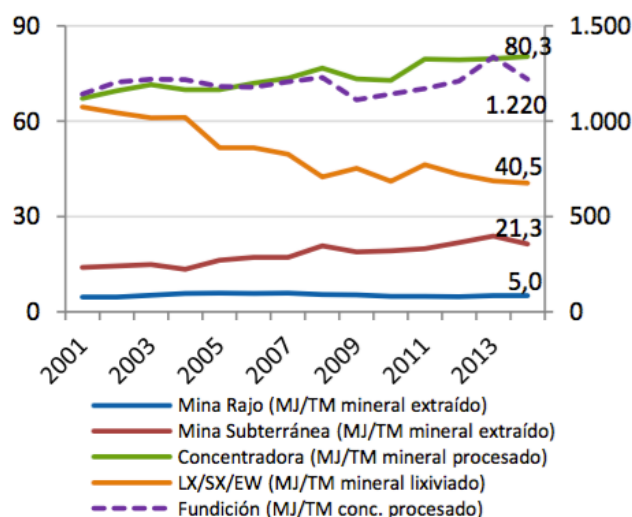


Figura 4.2: Consumo unitario de electricidad por tonelada de mineral procesado
Fuente: COCHILCO [13]

Los mayores consumos unitario de combustibles en el año 2014 corresponden al proceso de fundición con un valor de energía térmica de 1.381 [MJ/TM concentrado procesado], lo que equivale a 383,6 [kWh/TM concentrado procesado], y al proceso de mina rajo con 57,8 [MJ/TM mineral extraído], lo que equivale a 16,1 [kWh/TM mineral extraído].

Los mayores consumos unitarios de electricidad en el año 2014 corresponden al proceso de fundición con un valor de 1.220 [MJ/TM concentrado procesado], lo que equivale a 338,9 [kWh/TM concentrado procesado]; al proceso de concentradora con 80,3 [MJ/TM mineral procesado], lo que equivale a 22,3 [kWh/TM mineral procesado], y LxSxEw con 40,5 [MJ/TM mineral lixiviado], lo que equivale a 11,3 [kWh/TM mineral lixiviado].

Por lo tanto, es necesario analizar los SER dentro de los procesos mencionados anteriormente al ser los que consumen la mayor cantidad de energía por unidades de material procesado.

4.1.2 Sistemas energéticamente relevantes

Los sistemas energéticamente relevantes se clasifican en primera instancia en sistemas combustibles y sistemas eléctricos, cada uno de ellos se subdivide en sistemas más específicos. En la Figura 4.3 se presenta la clasificación propuesta para los SER en la minería chilena. Cabe destacar que las reducciones de consumo energético pueden desarrollarse en otros sistemas no considerados en este informe, como en sistemas de climatización, iluminación, entre otros. Sin embargo, su reducción no es relevante frente a las reducciones en los sistemas que si se analizan.

4.1.2.1 Sistemas Combustibles (SC)

Los sistemas combustibles consisten en todos los sistemas que utilizan como fuente de energía algún combustible. Este se subdivide en sistemas motrices de combustión interna, sistemas para generar calor directo y sistemas de calderas.

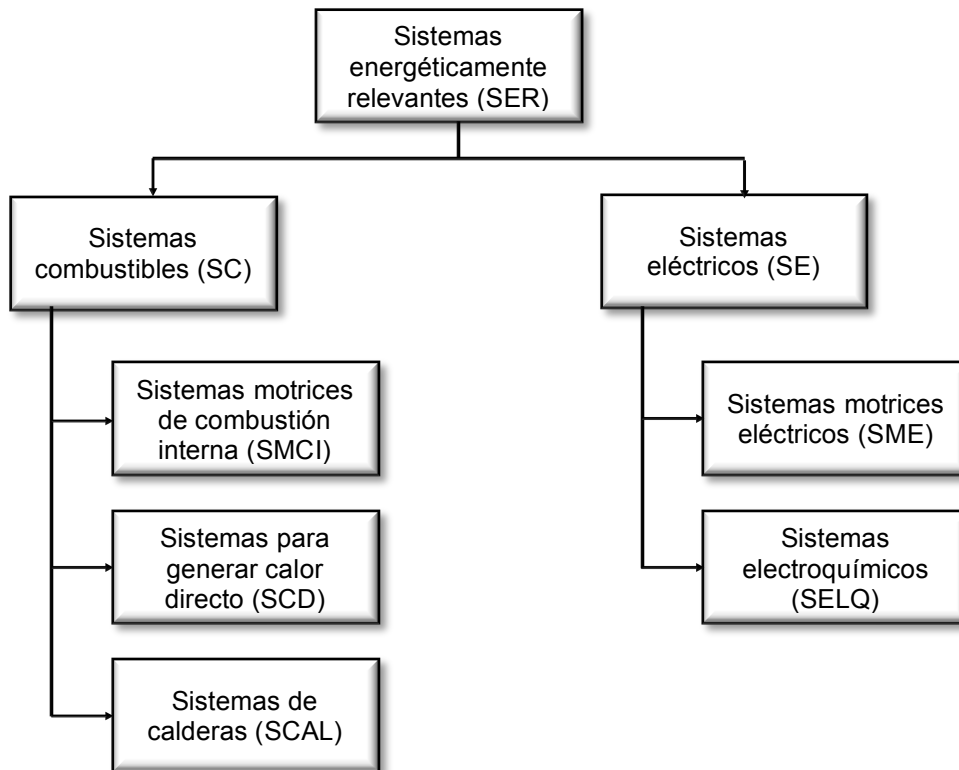


Figura 4.3: Clasificación propuesta de sistemas energéticamente relevantes en la minería
Fuente: Elaboración propia adaptado de [15]

4.1.2.1.1 Sistemas Motrices de combustión interna (SMCI)

Los SMCI consisten en cualquier motor, máquina o vehículo que desarrolle combustión interna. En la minería estos se encuentran principalmente en los camiones de carga de alto tonelaje y equipos de generación de electricidad en servicios varios.

- Camiones de carga de alto tonelaje:

Son los principales equipos de traslado de mineral desde la mina rajo hacia el chancador primario y de material estéril desde la mina hacia los botaderos. La capacidad de carga varía entre 100 a 350 toneladas típicamente. Los principales componentes de un camión de carga de alto tonelaje son el tren de fuerza (motor y transmisión), el chasis, frenos, caja de cambios, sistema de suspensión, dirección y neumáticos.

El principal equipo de consumo energético en un camión minero es el motor de combustión interna a diésel. En el Anexo A se encuentran las especificaciones técnicas de un modelo de camión minero.

- Equipos de generación de electricidad:

Los principales equipos utilizados son grupos electrógenos, turbinas a gas y turbinas a petróleo. Se utilizan para aplicaciones de respaldo frente a problemas en la distribución

principal de energía eléctrica. Los combustibles más utilizados son gas natural y petróleo enap 6.

4.1.2.1.2 Sistemas para generar calor directo (SCD)

Los SCD consisten en hornos con quemadores integrados. En la minería estos se encuentran en los procesos de fundición, es decir, fusión y piro-refinación. No se considera la conversión debido a que la generación de calor en los convertidores es autógena.

Existen diferentes tecnologías de fusión, las que se clasifican en fusión en baño, fusión en suspensión o fusión por calentamiento. En la Tabla 4.2 se presenta su clasificación.

Tabla 4.2: Clasificación de tecnologías de fusión

Tipo de fusión	Tecnología
Baño	Convertidor Teniente
	Noranda
	Vanyukov
	Isasmelt
	Mitsubishi
Suspensión	Outokumpu o Outotec
	Inco
	Contop
Calentamiento	Reverbero

Fuente: Elaboración propia adaptado de [16]

A continuación se describen brevemente las principales tecnologías utilizadas.

- Outotec [17]

El horno Outotec realiza fusión por suspensión, consiste en una torre de reacción con un quemador en la parte superior, una zona de sedimentación y una torre de captación para los gases de escape (Figura 4.4). Está diseñado para fundir hasta 4.500 toneladas de concentrado por día. Sus principales dimensiones son 26 m de largo, 8 m de ancho y 10 m de alto. Al 2010 se encontraban en operación alrededor de 30 unidades en el mundo.

En los quemadores se mezcla previamente el concentrado con aire o aire enriquecido en oxígeno, luego se sopla hacia el interior de la torre de reacción donde ocurre la oxidación del concentrado y se genera el calor necesario para la fusión. Las gotas de mineral fundido se depositan en la zona de sedimentación, aquí la mata (mineral fundido con alto contenido de cobre) es separada de la escoria por gravedad. Por último, los gases de escape, principalmente SO₂, se extraen por la torre de captación.

Todos los hornos Outotec vienen equipados con quemadores de hidrocarburos en la parte superior de la torre de reacción para mantener la reacción térmicamente estable. También hay quemadores en los muros y piso de la zona de sedimentación, estos se utilizan para eliminar las zonas de frío dentro de la mata y para ajustar la temperatura de la escoria.

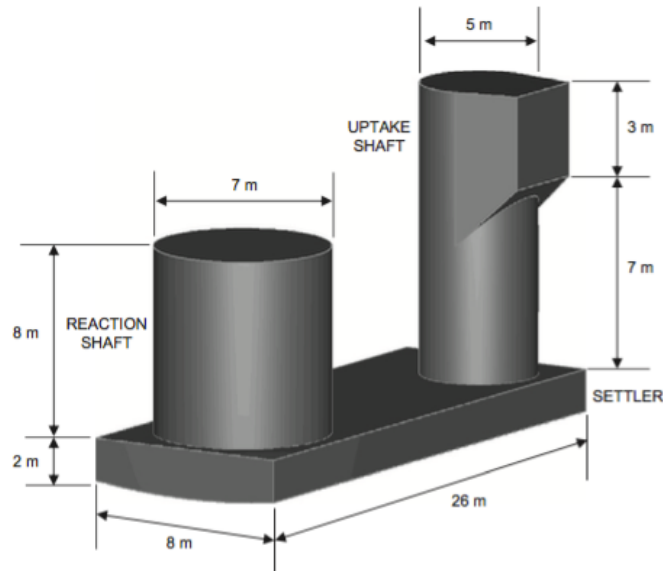


Figura 4.4: Diagrama Horno Flash Outotec
Fuente: [18]

La calidad de la mata y de la escoria es afectada por la cantidad de fundente, aire y oxígeno mezclado con el concentrado. En la Figura 4.5 se muestra un diagrama PFD del horno Outotec. En éste se observa que analizando la composición de la escoria, se controla la cantidad de fundente; y que analizando la composición de la mata, se regula la mezcla de aire-oxígeno, además la relación de nitrógeno-oxígeno es controlada por la temperatura de la escoria.

- Inco [17]

El horno Inco se utiliza en el proceso de fusión del concentrado. Consiste en soplar oxígeno industrial junto con el concentrado seco de forma horizontal en la zona de sedimentación, éstos reaccionan generando el calor necesario para realizar la fusión produciendo mata, escoria y gases de escape. Al año 2010 se encontraban 4 hornos Inco en operación en el mundo.

Los principales componentes del horno Inco son dos quemadores de concentrado a cada extremo del horno, por ellos se sopla oxígeno industrial y concentrado seco dentro del horno, además el sistema cuenta con una salida de gases de escape en el centro del horno (Figura 4.6).

Para que la reacción entre concentrado y oxígeno sea estable, entregando la energía necesaria para realizar la fusión, se requiere que el concentrado este seco. Por esta razón, previo al ingreso al horno se encuentran secadores que utilizan petróleo o gas natural como fuente de calor.

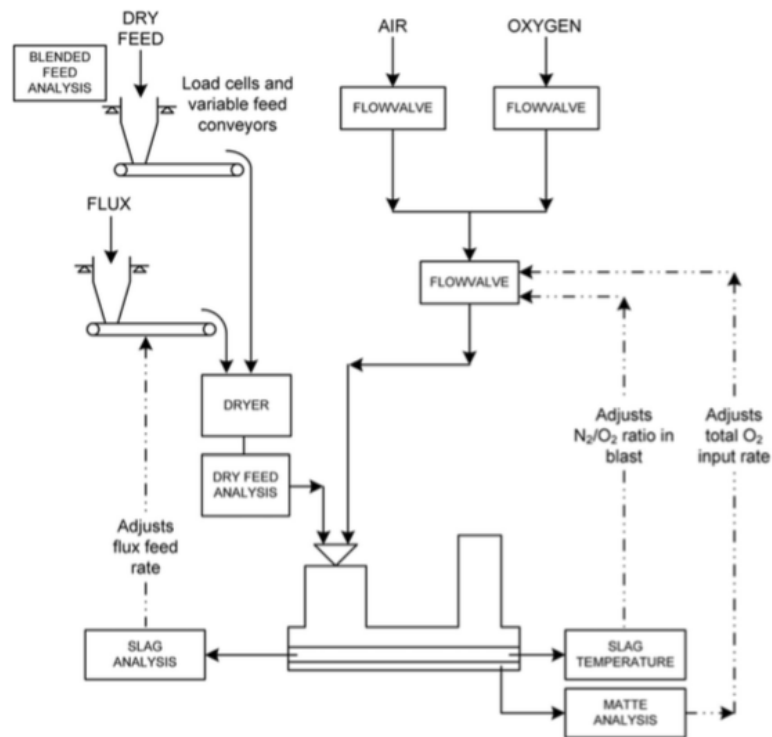


Figura 4.5: PFD de Horno Flash Outotec
Fuente: [17]

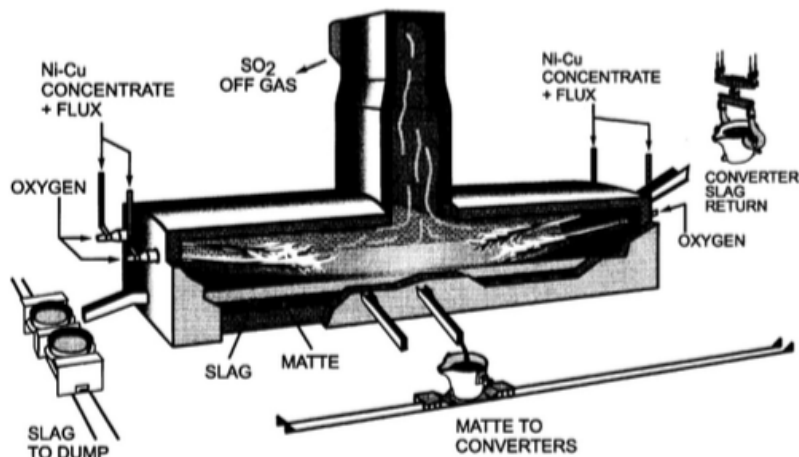


Figura 4.6: Diagrama Horno Flash Inco
Fuente: [17]

- Noranda y Convertidor Teniente [17]

El principio de funcionamiento de estas 2 tecnologías es similar. Ambos son hornos de fusión sumergida, es decir, el oxígeno para realizar la oxidación se inyecta mediante toberas sumergidas en la capa de mata. En el 2010 se encontraban en operación 3 hornos Noranda y 7 hornos convertidor teniente en el mundo.

Toda, o la mayoría, de la energía para calentar y fundir el concentrado proviene de la oxidación de Fe y S. Sin embargo, gas natural, carbón o coque pueden ser utilizados para complementar el calor requerido.

El funcionamiento de estos hornos consiste en que los concentrados y fundentes son fundidos rápidamente, debido a la turbulencia generada por el soplado de las toberas en el baño fundido. Al oxidarse el concentrado se genera calor utilizado para la fusión, además se produce SO_2 gaseoso que se elimina mediante la boca del horno que se encuentra en la parte superior.

Los hornos están equipados con un mecanismo de rotación. Se utiliza para colocar correctamente las puntas de toberas en la capa de mata fundida y para colocar las toberas por encima de los líquidos durante el mantenimiento.

En la Figura 4.7 y en la Figura 4.8 se presentan los diagramas de los convertidores Noranda y Teniente respectivamente.

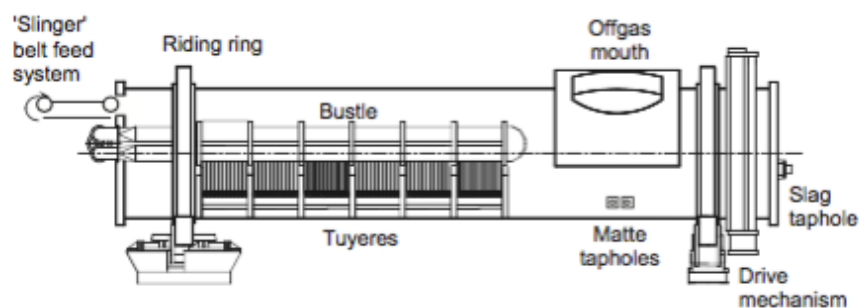


Figura 4.7: Diagrama convertidor Noranda
Fuente: [17]

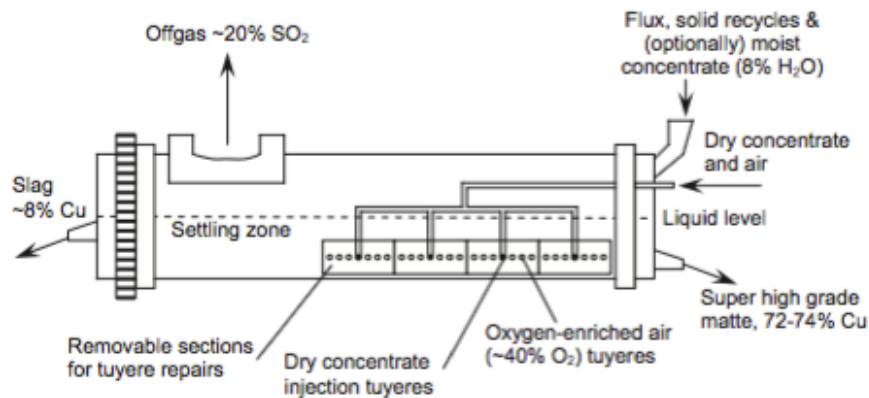


Figura 4.8: Diagrama Horno Convertidor Teniente
Fuente: [17]

- Horno de Reverbero [17]

Es el horno de tecnología más antigua, es de fusión por calentamiento directo. Usa como fuente de calor combustibles fósiles para la generación de mata, escoria y gases. Su funcionamiento consiste en la reflexión del calor producido en un sitio independiente del hogar donde se produce la llama. En la Figura 4.9 se presenta le diagrama del horno reverbero.

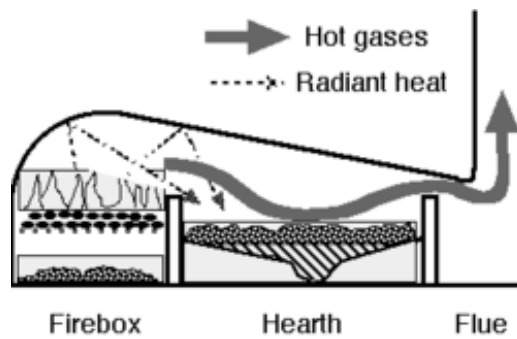


Figura 4.9: Diagrama Horno de Reverbero
Fuente: [18]

- Horno rotatorio de refinación a fuego [17]

La refinación a fuego se lleva a cabo en hornos rotatorios parecidos al convertidor Peirce-Smith (Figura 4.10) mediante un proceso discontinuo. Los hornos son calentados por la combustión de hidrocarburos, principalmente gas natural, petróleo, gas licuado de petróleo y gas propano o butano.

Los hidrocarburos gaseosos y líquidos se inyectan en el cobre blíster mediante las mismas toberas utilizadas para la inyección de aire. El gas natural es soplado en forma directa. El gas licuado de petróleo, propano y butano son soplados luego de ser vaporizados. El petróleo se atomiza y se inyecta con vapor.

Refinar una carga de 250 toneladas de cobre blíster (0,03% S) puede durar hasta 3 hora, 1 hora para la inyección de aire (remoción de S) y 2 horas en la inyección de hidrocarburos (remoción de O).

4.1.2.1.3 Sistemas de caldera (SCAL)

Los SCAL consisten en los equipos utilizados para calentar cualquier fluido. En la minería se encuentran principalmente calderas para generar agua caliente o vapor de agua para posteriormente calentar electrolito en los procesos de electro-refinación y electro-obtención.

Las calderas utilizan típicamente gas natural o petróleo como fuente de combustible.

4.1.2.2 Sistemas eléctricos (SE)

Los SE consisten en todos los sistemas que utilicen como fuente de energía electricidad. Estos se subdividen en sistemas motrices y sistemas electroquímicos.

4.1.2.2.1 Sistemas motrices eléctricos (SME)

Los SME consisten en cualquier sistema que requiera de un motor eléctrico para cumplir con su función. En la minería estos se encuentran principalmente en bombas hidráulicas, compresores, correas transportadoras, molinos y chancadores.

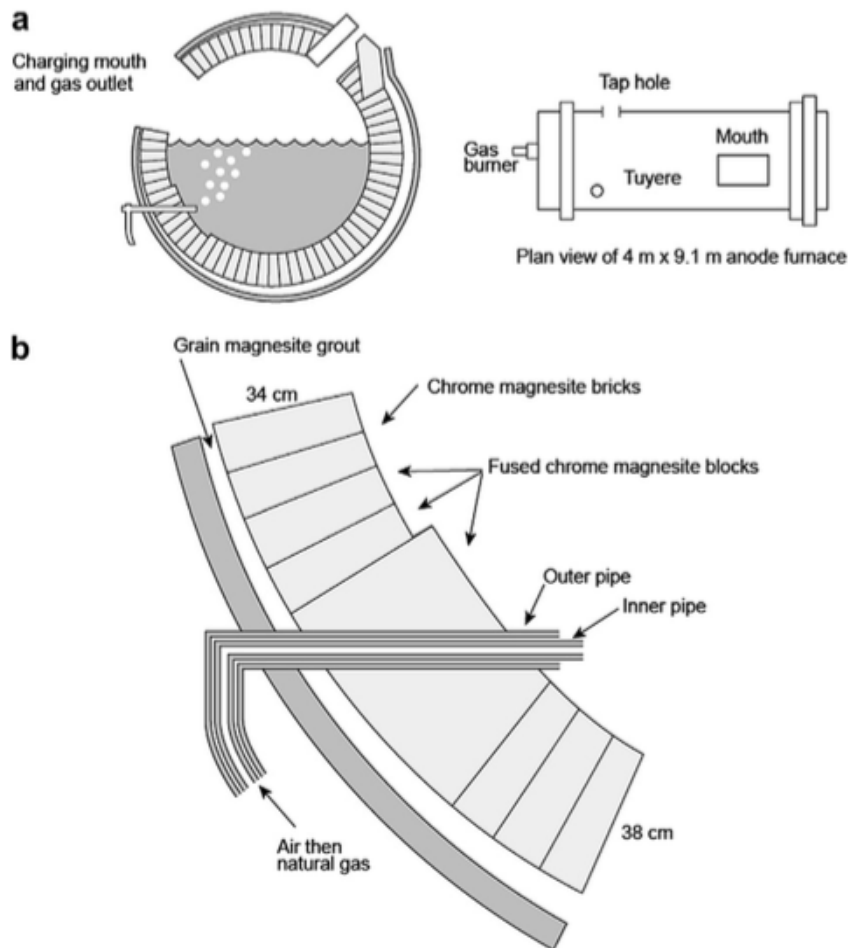


Figura 4.10: Diagrama horno rotatorio de refinación
Fuente: [17]

- Bombas hidráulicas

Se utilizan principalmente para el transporte de fluidos entre los diferentes procesos dentro de la planta y para entregar la fuerza de impulsión necesaria en los sistemas hidráulicos.

El funcionamiento de una bomba queda descrito típicamente por la altura que puede alcanzar el fluido en función del flujo. En la Figura 4.11 se muestran las curvas características de una bomba hidráulica.

- Compresores

Se utilizan en el proceso de flotación con el objetivo de inyectar aire a las celdas de flotación para realizar la separación del mineral de interés del estéril. Además, se encuentran en los procesos de fundición y refinación a fuego, en la inyección de aire o aire enriquecido con oxígeno a los hornos.

- Correas transportadoras

Las correas transportadoras permiten el traslado de material mediante un proceso continuo, dependiendo principalmente de la granulometría del material a acarrear. Se utilizan en el transporte de mineral sólido desde la etapa de chancado primario hacia las siguientes etapas de chancado o molienda.

Las principales ventajas de las correas transportadoras frente a los camiones de alto tonelaje son menores costos de operación, mayor seguridad, eficiencia y disponibilidad, versatilidad y adaptabilidad al perfil del terrero y al material a transportar.

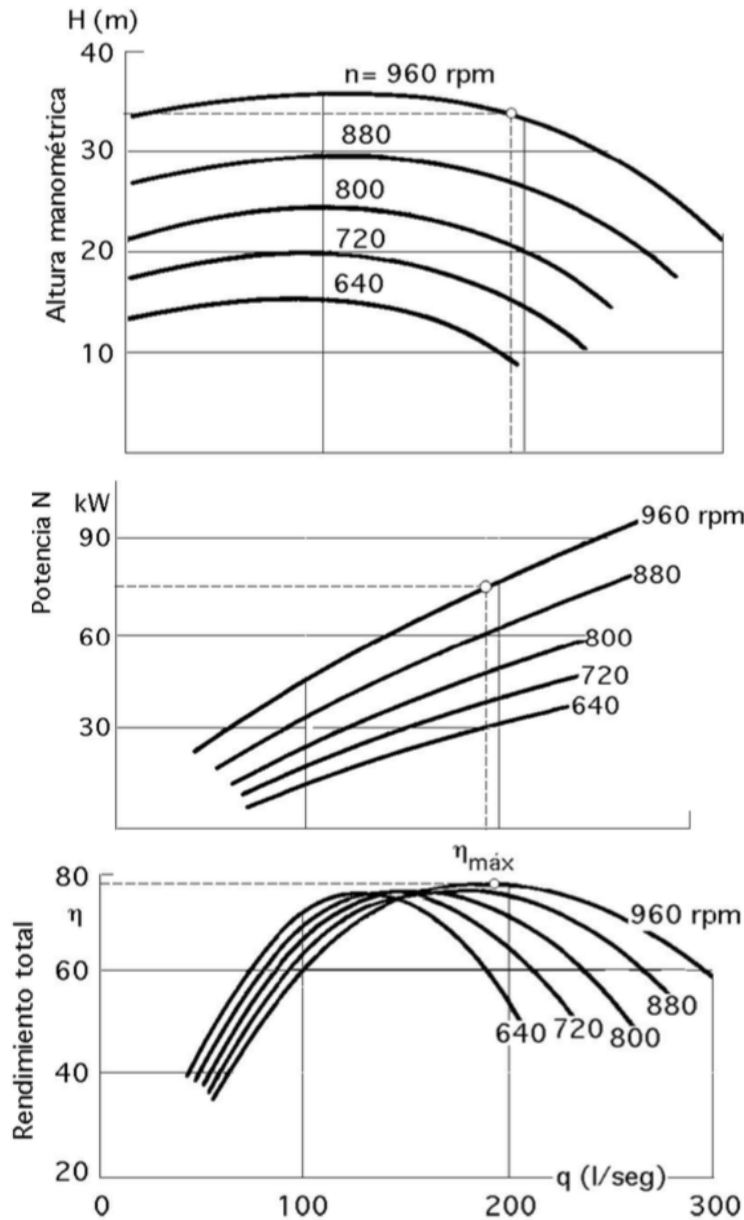


Figura 4.11: Curvas características de una bomba hidráulica típica
Fuente: [19]

- Chancadores [17]

Consiste en los equipos encargados de realizar las primeras etapas de conminución del material, el equipo más utilizado es el chancador giratorio (Figura 4.12). Disminuido el tamaño del mineral éste puede ser transportado hacia la etapa de molienda.

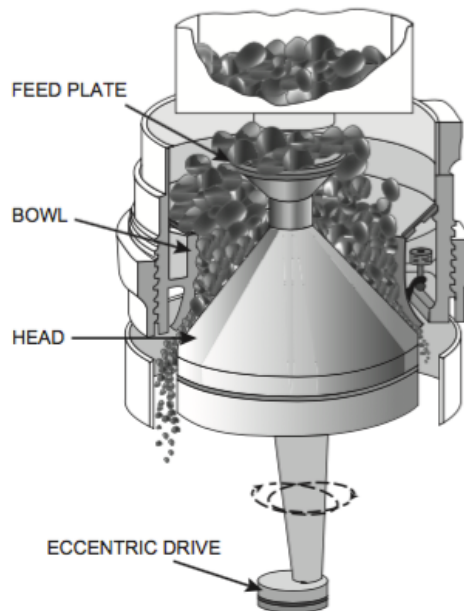


Figura 4.12: Diagrama chancador giratorio
Fuente: [17]

- Molinos [17]

Son los equipos de mayor consumo eléctrico. Producen partículas finas de mineral para la posterior recuperación de cobre por flotación. Los equipos más utilizados son el molino semiautógeno (SAG) (Figura 4.13) y el molino de bolas. Las dimensiones de cada equipo dependen de la cantidad de mineral a procesar y de las características del mineral. En esta etapa el mineral se encuentra en estado de pulpa.

La etapa de conminución normalmente consta de un molino SAG y uno o dos molinos de bolas (Figura 4.14). Es un proceso continuo. En el Anexo B se encuentran especificaciones técnicas de etapas de conminución utilizadas en plantas en operación en el mundo.

En los molinos SAG se utilizan bolas de acero de un diámetro aproximado de 13 cm para ayudar a moler el mineral. La cantidad de bolas depende del volumen del molino, normalmente la razón es 85% mineral y 15% bolas de acero.

El molino de bolas se utiliza posterior al molino SAG, siendo la última etapa de molienda antes del proceso de flotación. Las bolas poseen un diámetro entre 5 a 10 cm. La razón volumétrica dentro este tipo de molinos es normalmente 75% mineral y 25% bolas.

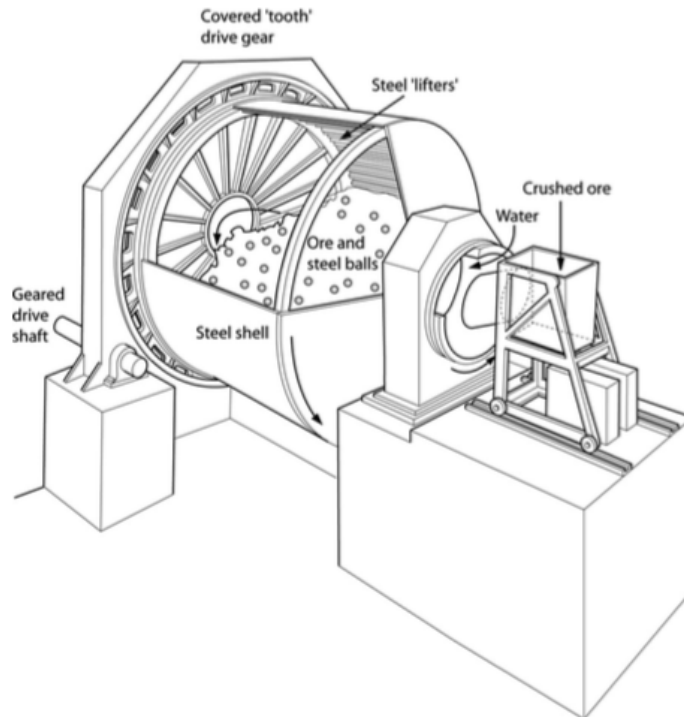


Figura 4.13: Diagrama de molino SAG
Fuente: [17]

El molino de bolas es operado en circuito cerrado con hidrociclones que envían el material de tamaño correcto a flotación y al material de gran tamaño de vuelta al molino de bolas hasta obtener el tamaño adecuado para la flotación.

4.1.2.2.2 Sistemas electroquímicos (SELQ)

Los SELQ consisten en los sistemas de energía eléctrica utilizados para los procesos de electro-obtención y electro-refinación.

- Planta de electro-refinación [17]

El proceso de electro-refinación consiste en que el cobre de los ánodos, provenientes de la refinación a fuego, se disuelve electroquímicamente en el electrólito, produciendo cationes de cobre más electrones. Los electrones producidos se conducen hacia el cátodo. Luego los cationes de cobre en el electrolito migran al cátodo por convección y difusión. Finalmente, los electrones y los iones de cobre se recombinan en la superficie del cátodo para formar metal de cobre.

En la Figura 4.15 se presenta un diagrama típico de un sistema de celda de electro-refinación.

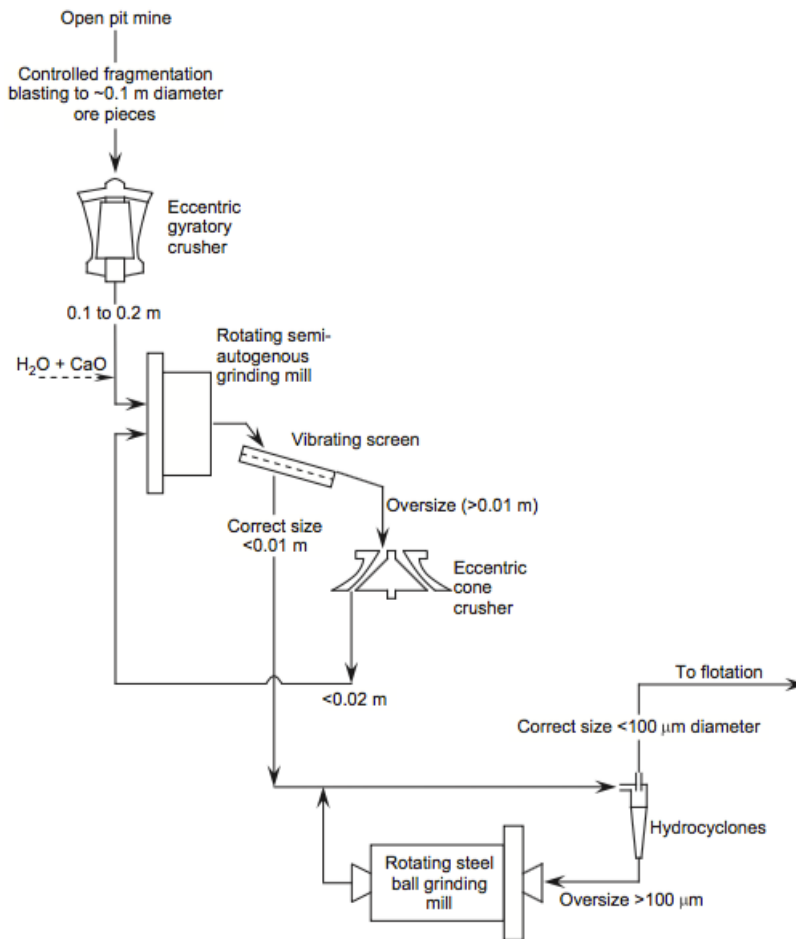


Figura 4.14: Diagrama de flujo de proceso de la etapa de conminución
Fuente: [17]

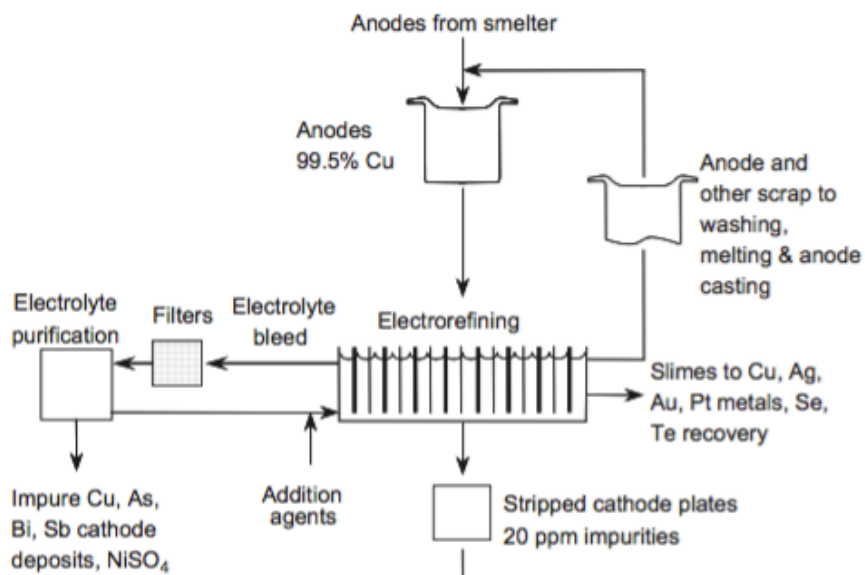


Figura 4.15: Diagrama de sistema de celdas de electro-refinación
Fuente: [17]

- Planta de electro-obtención [17]

El proceso de electro-obtención consiste básicamente en la inmersión de cátodos de metal y ánodos inertes, pero conductivos, en electrolito purificado que contiene CuSO_4 y H_2SO_4 . Luego se aplica corriente eléctrica provocando que esta fluya entre el cátodo y el ánodo conduciendo los iones de cobre del electrolito hacia el cátodo. Finalmente, el cobre se reduce formando placas de cobre puro.

En la Figura 4.16 se presenta un diagrama de una de celda de electro-obtención.

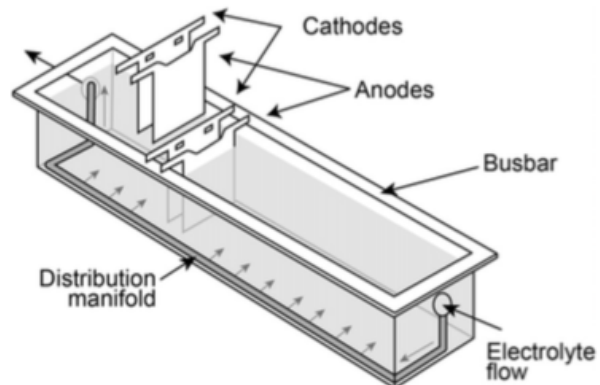


Figura 4.16: Diagrama de celda de electro-obtención
Fuente: [17]

4.2 Oportunidades de EE en minería

4.2.1 Oportunidades en procesos de conminución de material

4.2.1.1 Determinación de la energía necesaria en los procesos de conminución [20]

El uso de energía para fragmentar el material en los chancadores y molinos depende del tipo de tecnología utilizada, las propiedades de las superficies de trabajo, la lubricación, y si se realiza en de forma seca o húmeda.

La energía necesaria para la trituración se puede estimar usando la ecuación de Bond (4.1), que considera las propiedades del material, las dimensiones de la alimentación y el producto triturado.

$$W_b = 10 \cdot W_i \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad (4.1)$$

Donde:

W_b : Es el consumo específico de energía [kWh/T]

W_i : Es el índice de trabajo de Bond [kWh/T]

F : Diámetro de partículas de entrada [micras]

P : Diámetro de partículas de salida [micras]

Para la medición del tamaño de las partículas se considera que al menos un 80% en peso de las partículas tengan ese diámetro o menor. El índice de Bond se encuentra tabulado para varios minerales, pero se recomienda medirlo experimentalmente en las zonas de extracción.

Utilizando la fórmula de Bond se pueden modelar los efectos de las variaciones de operación y cómo afectan el consumo de energía del sistema. A modo de ejemplo, el aumento de energía en la tronadura para reducir el tamaño de las partículas de mineral, puede verse equilibrado por la energía que se ahorra en los procesos de conminución.

Puesto que el requisito de energía estimado por la fórmula Bond se basa en las propiedades del material, su valor también debe ser ajustado para tener en cuenta el equipo utilizado. Para los chancadores de mandíbula se amplifica por 2 la energía necesaria, para los chancadores giratorios por 1,6 y para los chancadores cilíndricos por 1,3.

4.2.1.2 Mejora de la fragmentación durante la tronadura [17]

La utilización de perforaciones más estrechas y el aumento de las cargas de tronadura son utilizados para producir fragmentos de mineral de menor tamaño o fragmentos de tamaño más uniforme.

Mediante la optimización de las condiciones de tronadura y la fragmentación en mina, se reduce la cantidad de energía necesaria en las posteriores etapas de conminución, por

lo tanto, disminuye la energía eléctrica por tonelada de mineral procesado. En la Figura 4.17 se muestra el porcentaje de fragmentos con un diámetro mayor a 0,1 m en tronadura según la carga por perforación.

La fragmentación se ha mejorado con la ayuda de dos tecnologías recientes:

- Determinación del tamaño de mineral en tiempo real.
- Determinación de la tenacidad del mineral en tiempo real.

La determinación del tamaño de mineral en tiempo real consiste en fotografiar digitalmente un conjunto de partículas de mineral en varios sectores de las etapas de trituración, para luego determinar la distribución de tamaño de partícula. Las mediciones de tamaño de partícula en tiempo real se usan para determinar si la cantidad de explosivos necesarios para las siguientes tronaduras debe ser aumentada o disminuida para asegurar la fragmentación óptima.

La determinación de la tenacidad del mineral en tiempo real consiste en que las máquinas de perforación modernas están equipados para medir la cantidad de energía necesaria para realizar un agujero. Cuanto mayor sea el requerimiento de energía, más resistente es el mineral alrededor de la perforación. Este conocimiento permite al ingeniero de tronadura ajustar la carga explosiva para obtener el nivel de fragmentación deseado.

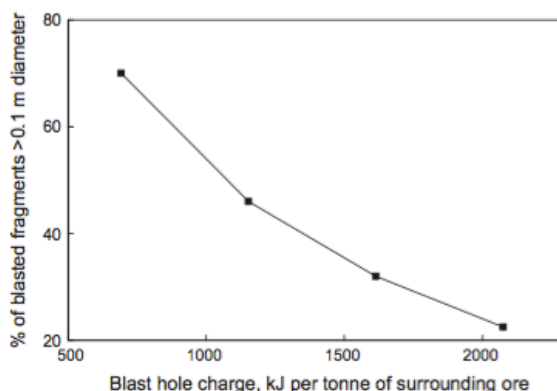


Figura 4.17: Porcentaje de fragmentos con un diámetro mayor a 0,1m en tronadura según la carga por perforación
Fuente: [17]

4.2.1.3 Control de la cantidad y tamaño de partícula en la alimentación de los equipos de conminución [20]

El uso de clasificadores (harneros) para mantener una alimentación dimensionada para el proceso de conminución proporciona una mayor eficiencia en los equipos de chancado y molienda.

La presencia de partículas más finas en procesos de conminución de partículas de gran tamaño son más difícil moler o triturar, ya que los finos tienden a ser desplazados en lugar de ser fracturados disipando energía. Al contrario, es importante que las partículas de gran tamaño no se encuentren en los procesos de conminución fina ya que reducen la eficiencia del proceso.

4.2.1.4 Control de la granulometría para el proceso de flotación [17]

Existe un óptimo de la granulometría para los procesos de recuperación de cobre en el procesos de flotación. Un diámetro grande permite que una mayor cantidad de cobre se combine con material no cuproso impidiendo su flotación. Un diámetro muy pequeño permite que sulfuros de hierro se aglomeren en las partículas de sulfuros de cobre evitando el contacto con las burbujas, por lo tanto su flotación.

El tamaño óptimo se encuentra aproximadamente en diámetros de 25 micrómetros. La flotación comienza a verse perjudicada cuando las partículas son menores a 10 micrómetros. En la Figura 4.18 se muestra el efecto de la granulometría en la recuperación de cobre en el concentrado, en cambio, en la Figura 4.19 se muestra el efecto de la granulometría en la concentración de cobre en los residuos.

El control del tamaño de las partículas permite obtener mayores contenidos de cobre por la misma cantidad de material procesado.

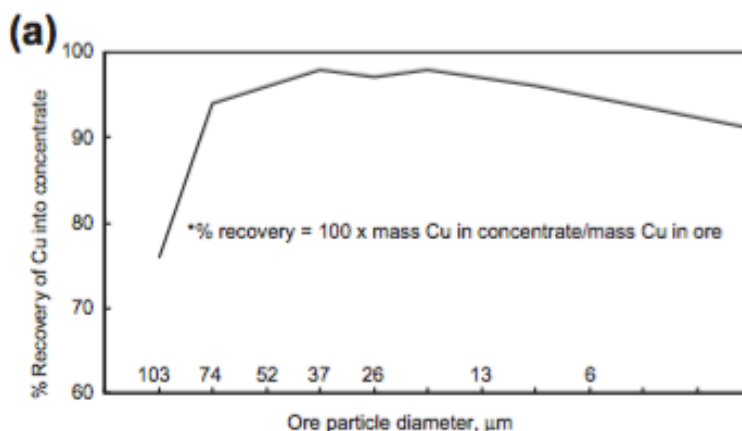


Figura 4.18: Efecto de la granulometría en la recuperación de cobre en el concentrado
Fuente: [17]

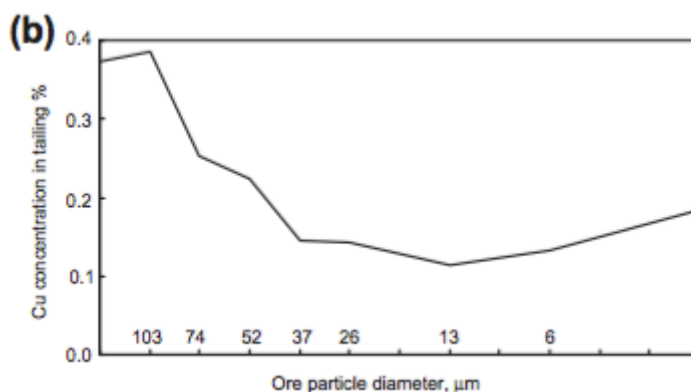


Figura 4.19: Efecto de la granulometría en la concentración de cobre en los residuos
Fuente: [17]

4.2.1.5 Implementación de molinos de rodillos de alta presión

El molino de rodillo de alta presión consiste de un par de rodillos que giran en sentido contrario, los que están montados sobre una resistente estructura (Figura 4.20). Uno de los rodillos está fijo a la estructura, mientras que el otro está dispuesto sobre rieles y puede ser regulado mediante pistones hidráulicos [21].

El primer molino de estas características fue implementado por primera vez en la industria del cobre en 2006 en la concentradora de Cerro Verde en Perú. Ha sido adoptado por varios productores de cobre como un reemplazo para los chancadores de cono posteriores al molino SAG en el flujo de conminución. Cada vez se ve más como un reemplazo potencial para el propio molino SAG [17].

Sus ventajas percibidas son 15 a 25% menos consumo de energía eléctrica por tonelada de mineral. Su principal desventaja parece ser la dificultad en el manejo de minerales húmedos, pegajosos y con alto contenido de arcilla; además de un costo de capital inicial de 10-25% más alto [17].

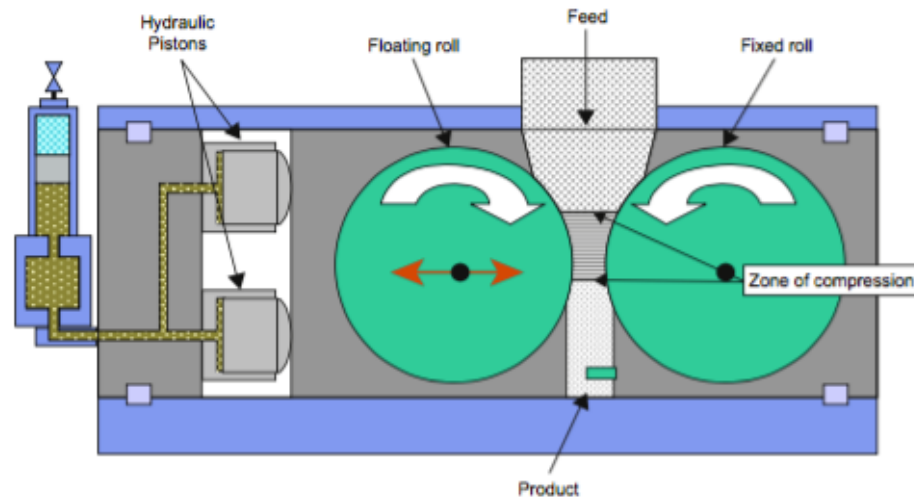


Figura 4.20: Diagrama del molino de rodillos de alta presión
Fuente: [17]

4.2.2 Oportunidades en proceso de electro-refinación

4.2.2.1 Pérdidas energéticas por cortocircuito entre ánodo y cátodo [17]

El cortocircuito es causado por el contacto entre ánodos y cátodos. Se evita con la colocación precisa y vertical de electrodos. Las pérdidas se minimizan mediante la pronta localización del cortocircuito y la eliminación de este. Se estiman pérdidas de un 3% de la energía total consumida en las celdas de electro-refinación modernas.

4.2.2.2 Pérdidas de corriente por fuga a tierra [17]

Las pérdida de fuga de corriente se deben en gran parte al flujo de corriente a tierra a través del electrolito derramado. Se minimiza con una buena aislación y mantenimiento

de la celda de electro-refinación. Se estiman del orden de 1% de la energía total consumida en las celdas de electro-refinación modernas.

4.2.2.3 Pérdidas por re-oxidación de cobre en el cátodo por O_2 y Fe_3^+

Cobre adherido en el cátodo puede ser re-oxidado de nuevo en el electrolito por la presencia de agentes oxidantes, tales como O_2 o Fe_3^+ . Esto se puede evitar reduciendo al mínimo la absorción de oxígeno en el electrolito, manteniendo el flujo de electrolito lo más estable que sea posible pero manteniendo la hidrodinámica adecuada para la transferencia de masa. Se estiman pérdidas del orden de 1% de la energía total consumida en las celdas de electro-refinación modernas.

4.2.2.4 Optimizar las condiciones de operación en las celdas de electro-refinación

El consumo total de energía eléctrica de un electro-refinación es de 300-400 [kWh/Ton] de cobre producido. Este se reduce al mínimo mediante la maximización de la eficiencia actual.

Los factores que tienen un impacto significativo en el rendimiento de la corriente en las celdas de electro-refinación son asegurar una distribución uniforme de la corriente a todos los electrodos, asegurar que los contactos eléctricos estén limpios y asegurar que los electrodos estén igualmente espaciados y colgados verticalmente.

4.2.2.5 Pérdidas de calor en electrolito [17]

La temperatura óptima de trabajo del electrolito en las celdas de electro-refinación es aproximadamente de 60°C. Dado esto existen pérdidas de calor al ambiente las cuales se pueden evitar aislando térmicamente las celdas, los tanques y tuberías, además se pueden cubrir las celdas con lona o láminas de plástico.

4.2.2.6 Cambio de fuente de energía para calentar electrolito [12]

Normalmente el electrolito es calentado mediante el intercambio de calor con agua caliente o vapor de agua. Estos últimos son generados mediante calderas que consumen petróleo o gas natural para generar el calor.

Se han implementado sistemas solares térmicos en reemplazo de las calderas en sectores con alta radiación solar. Esta no es una medida que disminuya el consumo de energía en el proceso, pero disminuye los costos operacionales debido a la eliminación de la compra de combustible fósil.

4.2.3 Oportunidades en procesos de electro-obtención

4.2.3.1 Pérdidas de energía en las celdas de electro-obtención [17]

Las eficiencias actuales en las plantas modernas de cobre de electro-obtención oscilan desde 85 hasta 95%. La corriente no utilizada se pierde por cortocircuito por contacto

entre ánodos y cátodos, fugas de corriente a tierra, reducción del cobre en el cátodo debido a presencia de O_2 y Fe^{3+} , redisolución y oxidación del metal depositado en el fondo de la celda, y caída del metal depositado en el cátodo por lo que no puede ser cosechado.

Los cortocircuitos entre los ánodos y cátodos son detectados por las inspecciones de medidores infrarrojos y por mediciones de tensión individuales en las celdas. Además, se debe garantizar que los electrodos están espaciados uniformemente, de forma recta y vertical.

El cortocircuito químico Fe^{+3} a Fe^{+2} se minimiza reduciendo al mínimo la concentración de hierro en el electrolito. Esto se hace mediante extracción por solventes, procurando que estas partículas no se encuentren en el electrolito.

4.2.3.2 Optimizar la eficiencia de corriente [17]

La eficiencia de corriente generalmente aumenta con el aumento de las concentraciones de ácido y cobre en el electrolito, además con la densidad de corriente (j), pero disminuye con el aumento de la concentración de Fe^{+3} y la temperatura.

Una correlación práctica y útil que se puede utilizar para optimizar la eficiencia de la corriente para el funcionamiento a 40 °C es:

$$\xi(\%) = 88,19 - 4,19 \cdot [Fe^{+3}] + 0,52 \cdot [Cu^{+2}] + 1,81 \cdot 10^{-3} \cdot j - 6,83 \cdot 10^{-3} \cdot [Cu^{+2}]^2 + 0,028 \cdot [Fe^{+3}] \cdot [Cu^{+2}] + 4,015 \cdot 10^{-3} \cdot j \cdot [Fe^{+3}] \quad (4.2)$$

Donde:

ξ : Eficiencia de corriente

$[Fe^{+3}]$: Concentración de Fe^{+3} [g/L]

$[Cu^{+2}]$: Concentración de Cu^{+2} [g/L]

j : densidad de corriente [A/m^2]

4.2.3.3 Cambio de fuente de energía para calentar electrolito [12]

El electrolito de electro-refinación normalmente es calentado mediante el intercambio de calor con agua caliente o vapor de agua, sin embargo, la temperatura óptima es de 40°C para este proceso. Al igual que para los procesos de electro-obtención, se puede implementar calentamiento mediante tecnologías termosolares.

4.2.4 Oportunidades en procesos de transporte con camiones de alto tonelaje

4.2.4.1 Reducción del peso del vehículo [20]

Aproximadamente 40% del peso bruto operativo del camión es por el propio peso del vehículo. Esto significa que existe el potencial para mejorar la eficiencia del combustible mediante la reducción de peso del vehículo. Por ejemplo, se puede ocupar acero de alta resistencia en la estructura principal del camión, reduciendo teóricamente un 25% del peso, lo cual se refleja en un ahorro aproximado de 2,3% de energía.

4.2.4.2 Gestión de carga útil [20]

Los camiones de transporte son más eficientes cuando están completamente cargados. La optimización de carga puede proporcionar mejoras significativas en la eficiencia. La reducción de carga a 80% de la máxima y el aumento de velocidad de acuerdo con la curva de rendimiento en pendientes (Anexo A), aumenta el consumo de combustible por tonelada en un 20%. Cargar el camión en un 90%, aumenta el consumo de combustible en un 9% más por tonelada que con carga completa.

4.2.4.3 Mejoras operativas: mantenimiento, neumáticos y formación de conductores [20]

La correcta conducción del camión puede proporcionar beneficios de eficiencia de combustible que son equivalentes, y a veces mayor que la mejora de las tecnologías de motores, a menudo a un costo menor.

Según ETAG (Energy and Tourism – Australian Government) [20] se sugiere que la conducción agresiva puede aumentar el consumo de combustible en un 30%, un mal mantenimiento puede aumentar el consumo de combustible en entre un 4 a 40%, mientras que la inflación de neumáticos bajo el óptimo y filtros de aire obstruidos pueden aumentar el consumo de combustible hasta un 3% y 10% respectivamente.

Un ejemplo de mal mantenimiento es que los frenos en mal estado tienden a favorecer un frenado adicional del motor, aumentando el consumo de combustible y causando un desgaste adicional en el sistema de transmisión. La lubricación optimizada tienden a reducir las pérdidas por fricción en el motor y en la transmisión.

Los niveles de inflación de neumáticos pueden cambiar la cantidad de resistencia a la rodadura y el coeficiente de tracción, afectando el rendimiento de transmisión de potencia del motor hacia las ruedas para trasladar el material.

4.2.4.4 Selección de vehículos y el diseño de caminos de traslado

El desarrollo de un modelo de consumo de energía para el transporte puede ayudar a evaluar diseños alternativos en la compra de nuevos camiones. Por ejemplo, un modelo puede ser utilizado para estimar objetivamente las ventajas de los diseños del cuerpo más ligero, cargas útiles más grandes, sistemas de carga útil más avanzados o de gestión de flota.

Al establecer ampliaciones de los yacimientos existentes, el diseño de los caminos y el mantenimiento de carreteras potencialmente puede proporcionar un ahorro de energía. Por ejemplo, el riego de los caminos afecta a la resistencia a la rodadura y el consumo de energía, así como la reducción de las partículas de polvo suspendidas en el aire.

4.3 Metodología para análisis de oportunidades y medidas de EE

En éste capítulo se presenta y explica la metodología para análisis de oportunidades y medidas de EE para completar de forma correcta el Manual de Eficiencia Energética en Minería presentado en el capítulo 4.5 del presente informe, en donde se encuentran las tablas a las que se hace referencia en este capítulo.

La metodología se desarrolla basándose en información de diversas instituciones especialistas en eficiencia energética, tanto en Chile como en el extranjero. La finalidad de la metodología es estandarizar un procedimiento para encontrar oportunidades de eficiencia energética en las diversas faenas de producción de cobre, además entrega las herramientas para proponer medidas de eficiencia energética basado en lo anterior.

La metodología tiene 3 etapas diferenciadas (Figura 4.21): Análisis del consumo energético, Análisis del uso energético y Análisis de oportunidades y medidas de EE. A continuación se explican las etapas y presentan las herramientas necesarias para realizarlas.

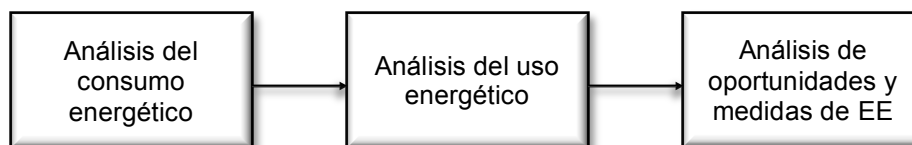


Figura 4.21: Diagrama de flujo de procesos de metodología para análisis de oportunidades y medidas de EE
Fuente: Elaboración propia adaptado de [1]

4.3.1 Análisis del consumo energético

El objetivo del análisis del consumo energético es presentar los aspectos relacionados con la caracterización energética de la empresa a nivel de consumo, para ello se deben indicar las fuentes de energía que se utilizan, el consumo energético y los gastos monetarios clasificados según su fuente de energía, finalmente determinar los indicadores de consumo y gasto energético. El diagrama de flujo de procesos del desarrollo de las actividades se presenta en la Figura 4.22.

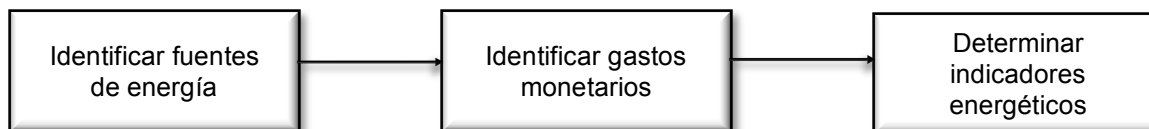


Figura 4.22: Diagrama de flujo de procesos de análisis del consumo energético
Fuente: Elaboración propia adaptado de [1]

4.3.1.1 Identificar fuentes de energía

El propósito es conocer los energéticos utilizados y el porcentaje de participación de cada uno de ellos en la matriz energética de la empresa. Se realiza un análisis mensual y anual para poder determinar estacionalidades y su relación con el proceso productivo.

Primero se revisan las facturas para reconocer los energéticos utilizados, principalmente en la minería chilena son la electricidad, el diésel, enap 6 y gas natural. Además se determina la cantidad física y unidad de cada fuente. Luego se obtiene el contenido energético utilizando factores de conversión entregados por el Centro Nacional de Energía (CNE). Finalmente se realiza una comparación determinando el porcentaje de consumo total de energía.

En la Tabla 4.3 se presenta un formulario para realizar identificación de fuentes de energía, el cual permite tener un orden de la información de las facturas y realizar la comparación inmediatamente.

4.3.1.2 Identificar gastos monetarios

Un factor importante a conocer dentro del consumo energético es el porcentaje de participación de los gastos energéticos. Para ello, al igual que en la identificación de las fuentes de energía, se realiza un análisis mensual y anual.

Basándose en las mismas facturas utilizadas en la etapa anterior se determina por cada fuente la cantidad física con su respectiva unidad, además se obtiene el gasto monetario y su precio específico (unidad monetaria por unidad física). Por último, se realiza una comparación determinando el porcentaje de participación de los gastos energéticos.

En la Tabla 4.4 se presenta un formulario para realizar identificación de gastos monetarios, el cual permite tener un orden de la información de las facturas y realizar la comparación inmediatamente.

4.3.1.3 Determinar indicadores energéticos

Con toda la información recopilada en las etapas anteriores se procede a determinar los principales indicadores utilizados en la minería chilena. La finalidad de este proceso es conocer el estado actual de la empresa y compararlo con alguna referencia, por ejemplo, el promedio estadístico que entrega la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO).

El consumo específico consiste en la energía consumida por tonelada métrica fina (TMF) de cobre producido, para obtener este indicador se consideran todos los consumos energéticos del proceso o de la línea de producción a evaluar, luego se divide por la cantidad de toneladas producidas o tratadas durante el proceso. Este indicador permite comparar la eficiencia de ciertos procesos con otras empresas, logrando identificar los procesos menos eficientes para así buscar medidas de EE en ellos.

La intensidad energética, a diferencia del consumo específico, se calcula a nivel de la empresa completa. Se considera todo el consumo de energía y se divide por las ventas de productos finales. Este indicador permite realizar una comparación global del buen o mal uso de la energía frente a otras compañías.

El gasto energético es uno de los indicadores más importantes al momento de tomar decisiones en el negocio minero. Consiste en el gasto monetario total dividido por las toneladas de cobre producido, en otras palabras, cuales son los gastos monetarios en

energéticos por cada tonelada. Ayuda a conocer hasta que nivel, el negocio, se hace rentable considerando constantes el resto de los gastos monetarios en la producción.

En la Tabla 4.5 se presenta un formulario para los indicadores determinados, éste permite colocar el estado actual, un valor referencial que se obtiene de datos promedios estadísticos por COCHILCO y, por último, el valor al cual se aspira llegar luego de aplicar medidas de EE.

4.3.2 Análisis del uso energético

El análisis del uso energético busca conocer el flujo de energía dentro de los sistemas energéticamente relevantes y en qué se utiliza la energía (generar calor, transporte de material, etc.). El diagrama de flujo de procesos del desarrollo de las actividades se presenta en la Figura 4.23.

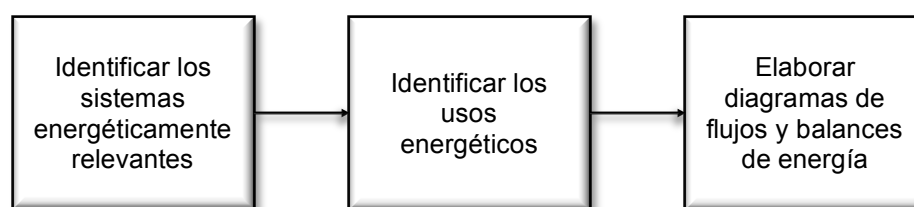


Figura 4.23: Diagrama de flujo de procesos de análisis del uso energético
Fuente: Elaboración propia adaptado de [1]

4.3.2.1 Identificar los sistemas energéticamente relevantes (SER)

El objetivo es conocer cuales son los sistemas que consumen mayor energía en la empresa, para después aplicar medidas de eficiencia energética en estos sistemas. En el capítulo 4.1 se identifican los sistemas energéticamente relevantes junto con los procesos en los cuales se encuentran.

En la Tabla 4.6 se presenta un formulario para identificación de SER dentro de la planta. Este se basa en que cada proceso general de la planta se relaciona directamente con uno o más sistemas energéticamente relevantes. Se debe determinar el consumo energético por cada SER.

4.3.2.2 Identificar los usos energéticos

Una vez determinados los SER se requiere identificar en que se utiliza la energía. Estos se clasifican en usos térmicos y usos mecánicos. En la Tabla 4.7 se presentan usos generales de la energía en la minería. Se debe determinar el consumo energético por cada uso.

4.3.2.3 Elaborar diagramas de flujos y balances de energía

El objetivo es tener un apoyo visual del flujo de energía dentro de los procesos y equipos, de esta forma se pueden identificar los oportunidades de reducción de consumo energético.

Los diagramas de flujo y balances de energía se desarrollan utilizando planos de las instalaciones, layout de procesos y cualquier documento relevante existente. Es importante destacar el ingreso de energía en cada equipo.

Se recomienda comenzar por un diagrama general de la planta y luego ir profundizando por cada sistema energéticamente relevante, poniendo énfasis en las pérdidas e ineficiencias en los procesos.

4.3.3 Análisis de oportunidades y medidas de EE

El análisis de oportunidades y medidas de EE tiene como finalidad encontrar una amplia gama de oportunidades de EE, para luego determinar la factibilidad técnica-económica de las medidas de EE. El diagrama de flujo de procesos del desarrollo de las actividades se presenta en la Figura 4.24.

4.3.3.1 Definir equipos que son relevantes para el consumo energético

Con la información obtenida en los pasos anteriores de esta metodología (capítulo 4.3.1 y 4.3.2), se procede a identificar los equipos relevantes energéticamente. Existen equipos con bajo consumo, pero que se encuentran en grandes cantidades; por esta razón se debe determinar la energía que consumen y el número de unidades.

En la Tabla 4.6 se muestran, junto con los SER, los principales equipos energéticamente relevantes por proceso.

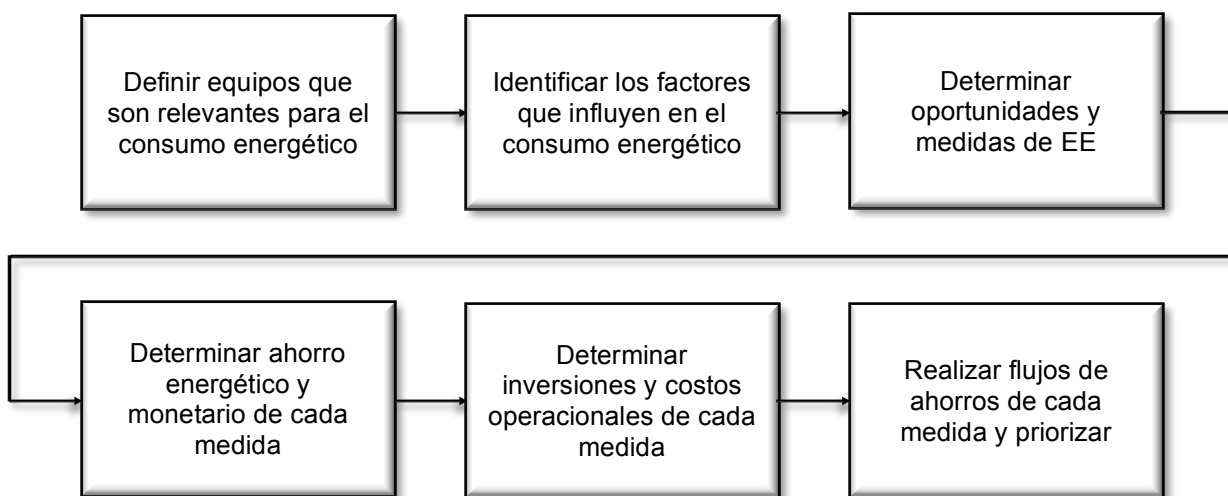


Figura 4.24: Diagrama de flujo de procesos de análisis de oportunidades y medidas de EE

Fuente: Elaboración propia adaptado de [1]

En la Tabla 4.8 se presenta el formulario para equipos energéticamente relevantes. En el se deben identificar los equipos con el respectivo proceso en el que se encuentran, la cantidad, potencia unitaria y total, tiempo de operación (el cual puede ser diario, mensual o anual, dependiendo del periodo que se analiza) y finalmente la energía total consumida.

4.3.3.2 Identificar los factores que influyen en el consumo energético

Ya identificados los equipos energéticamente relevantes, se procede a determinar los factores que afectan su rendimiento. Se tienen que considerar factores internos de los equipos y externos, como el clima. Además de mencionar los factores, se debe cuantificar el impacto que tienen sobre el consumo energético.

4.3.3.3 Determinar oportunidades y medidas de EE

La determinación de oportunidades de EE se realiza en 3 niveles. Primero se analiza la demanda final de energía consumida, luego se estudian las tecnologías utilizadas y finalmente las fuentes de energía. Este orden se debe a que es contraproducente realizar primero cambios en el suministro cuando la demanda total de energía va a ser reducida [1].

- Oportunidades de reducción de energía

El objetivo es determinar si la demanda de energía es la que efectivamente se necesita. Ya identificados los procesos utilizados por la planta previamente según esta metodología, se tiene que preguntar por qué se realizan estos procesos y no otros, cuánta energía se consume y cuánto es lo que de verdad se requiere para satisfacer los usos finales.

Si la brecha entre la energía realmente necesaria y la energía consumida es amplia, se tiene una oportunidad de mejora y se deben buscar medidas de EE como cambios en la operación de los equipos o cambios en la línea de producción.

- Oportunidades de mejoras tecnológicas

El objetivo es evaluar si es posible mejorar el desempeño de los equipos. Ya realizadas mediciones y observaciones en planta, se consideran mejoras en la operación, mantenimiento y calidad de las tecnologías utilizadas. Es importante conocer los factores que afectan el rendimiento de los equipos para analizar si la operación se realiza de forma adecuada o si se puede mejorar.

Junto con el análisis de la operación de los equipos, hay que verificar si los equipos presentan deterioro por su vida transcurrida. De requerir un cambio de equipo, se debe buscar alguno con mejor rendimiento para los requerimientos de operación en los procesos de la planta. También se consideran las pérdidas encontradas en los balances de energía y se investigan medidas para disminuirlas.

- Oportunidades de mejora en el aprovechamiento del recurso energético

El objetivo es identificar si existen opciones que permitan aprovechar mejor el suministro de energía. En esta etapa no se busca que los procesos disminuyan sus requerimientos energéticos, sino optimizar la energía. Es decir, buscar si alguna pérdida de un proceso puede reutilizarse en otro, o si puede darse un uso distinto para no ser un desperdicio.

Además, se estudia la existencia de alguna fuente de energía natural que permita reemplazar la fuente actual con la finalidad de disminuir los costos de operación.

4.3.3.4 Determinar el ahorro energético y monetario de cada medida de EE

Se determina el ahorro energético que se puede obtener para cada una de las medidas de EE identificadas, de forma independiente. Si existe incertidumbre sobre el posible ahorro, ya que los factores que afectan al consumo de los equipos son variables, se recomienda realizar análisis considerando la situación más favorable, la menos favorable y una situación promedio.

El ahorro monetario para cada medida de EE se determina con el precio específico, obtenido al observar las facturas del análisis del consumo energético, el cual se multiplica por el ahorro energético y un factor de conversión de unidades (cuando aplique).

Ambos cálculos se realizan para periodos de tiempos iguales, éste puede ser semanal, mensual o anual. Típicamente se realiza de forma anual para el posterior desarrollo del flujo de caja. En la Tabla 4.9 se presenta el formulario para determinar los ahorros.

4.3.3.5 Determinar inversiones y costos operacionales de cada MEE

Para cada MEE se determina la inversión sin considerar el montaje ni la preparación de terreno en caso de ser necesario, es decir, se considera la compra de equipos principalmente. Además se determinan los costos operacionales, como la necesidad de un nuevo operario para el control del equipo. La inversión y los costos operacionales se estiman mediante cotizaciones.

4.3.3.6 Realizar flujos de ahorros de cada medida

A continuación se realizan los flujos valorados de ahorro de energía, de forma independiente para cada MEE considerando la situación actual con medida. En la Tabla 4.10 se presenta el formulario estándar para desarrollo de valoración económica de cada MEE.

Una MEE se considera factible económicamente cuando su VAN es positivo 0 y si su PRI es inferior a la vida útil de la planta.

Las MEE analizadas se priorizan según criterios de la empresa. La priorización puede ser por beneficios económicos, complejidad de implementación, beneficios ambientales, mejoras en la productividad, entre otros. En la Tabla 4.11 se presenta un formulario para comparar MEE según indicadores económicos.

4.4 Metodología para construcción del proyecto de inversión en EE (PIEE)

En éste capítulo se presenta y explica la metodología para construcción del PIEE, para completar de forma correcta el Manual de Eficiencia Energética en Minería, presentado en el capítulo 4.5 del presente informe.

El PIEE consiste en un conjunto de medidas de eficiencia energética elegidas para implementar en la empresa. El diagrama de flujo de la metodología propuesta se presenta en la Figura 4.25.

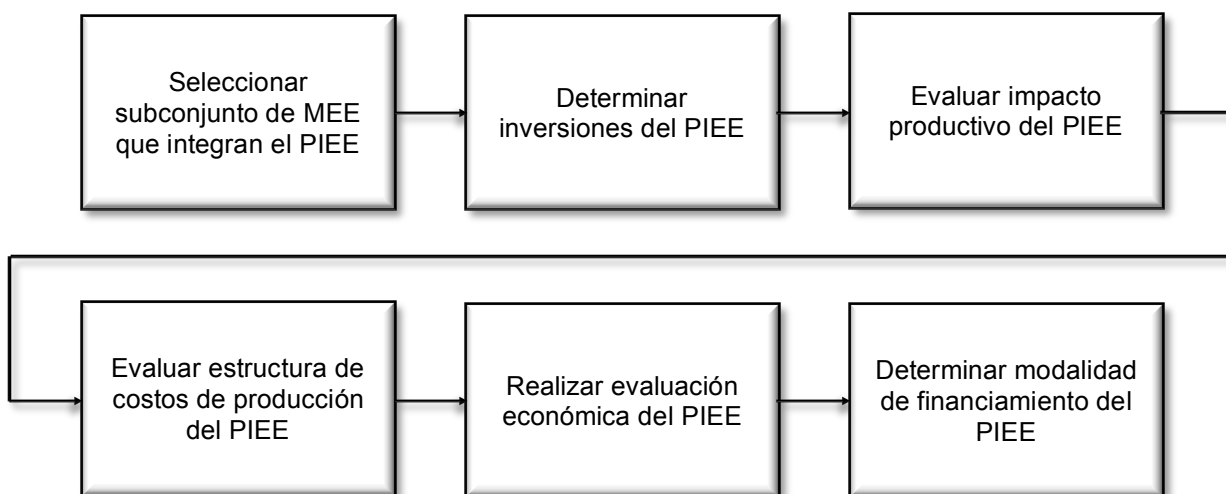


Figura 4.25: Diagrama de flujo de proceso de metodología para construcción del proyecto de inversión
Fuente: Elaboración propia adaptado de [22] y [23]

4.4.1 Seleccionar subconjunto de MEE que integran el PIEE

Las MEE pueden clasificarse por el impacto en los ahorros y el PRI de la siguiente manera:

- Alto impacto de ahorros con bajos PRI (<5 años).
- Alto impacto de ahorros con altos PRI (>5 años).
- Bajo impacto de ahorros con bajos PRI.
- Bajo impacto de ahorros con altos PRI.

La selección de las MEE a integrar el PIEE depende de los objetivos que la empresa quiere alcanzar. Si la finalidad del PIEE es reducir considerablemente el consumo energético sin importar el tiempo que demore la recuperación de la inversión, se integran al PIEE las medidas de alto impacto de ahorros. Sin embargo, si la empresa quiere que la inversión se recupere en el menor tiempo posible, se priorizan las MEE con PRI bajos. Normalmente se seleccionan las MEE de alto impacto de ahorro con bajos PRI.

4.4.2 Determinar inversiones del PIEE

Seleccionado el subconjunto de MEE que integran el PIEE, se determinan las inversiones necesarias para implementar el PIEE. Estas corresponden a un mayor detalle que las

presentadas en el análisis independiente de cada medida de EE. En las inversiones se consideran (si corresponden) los costos por adquisición, internación y traslado de equipos, ingeniería de detalle, puesta en marcha y pruebas. Se estiman mediante cotizaciones. En el caso de MEE que correspondan a mejoras operacionales y al correcto uso de los equipos, se consideran en la inversión las capacitaciones de personal necesarias.

4.4.3 Evaluar impacto productivo del PíEE

Una MEE no necesariamente proporciona disminución del consumo de energía, sino que puede aumentar la producción manteniendo el mismo consumo energético. Por esta razón, se debe determinar si el PíEE produce un impacto en la producción. Esto se verá reflejado en los ingresos del flujo de caja a realizar.

4.4.4 Evaluar estructura de costo de producción del PíEE

La estructura de costos de producción consiste en determinar los costos fijos y costos variables del PíEE. En los costos fijos se deben considerar (si corresponde) salarios de personal (jefe de operaciones y operadores), mantenimiento y repuestos. En los costos variables se deben considerar los costos energéticos (electricidad y combustible) e insumos de procesos (si corresponde).

4.4.5 Realizar evaluación económica del PíEE

Se realizan los flujos de caja para la situación sin proyecto, la situación con proyecto y el flujo marginal.

En el flujo de caja sin proyecto, se evalúa el desempeño de la empresa en un horizonte temporal definido previamente. Para esto se incluye una proyección de los gastos (insumos, costos de operación, costos de energía, etc.).

Para la situación con PíEE se realiza un segundo flujo de caja, donde se completa el flujo de caja de la situación actual, considerando el total de las inversiones en medidas de EE según el momento en que se hará la inversión de cada una de ellas, el ahorro anual que produce el proyecto, los cambios en la producción, etc.

Con el flujo de caja de la situación sin proyecto y el de la situación con proyecto, se prepara un tercer flujo de caja basado en la diferencia entre ambos o flujo de caja marginal (FCM). El FCM puede entregar un flujo de ahorros o un flujo de ahorros más aumento de ingresos, si el PíEE mejora la eficiencia global de la operación.

Después de realizar los flujos de caja se obtienen los indicadores económicos VAN, TIR y PRI. Además, se realizan análisis de sensibilidad variando el precio de la electricidad y combustible, tiempos de operación, factores de carga y eficiencia de los equipos. Un proyecto se considera económicamente factible cuando su VAN es positivo y el PRI es inferior a 5 años. La significación de los índices del FCM radica en que el VAN y el TIR marginal pueden ser valores muy altos, lo cual indica que el proyecto es muy atractivo de ejecutar y su flujo marginal podría incluso financiar el proyecto.

4.4.6 Determinar modalidad de financiamiento del PíEE

Realizado el flujo de caja marginal y obtenidos los indicadores VAN, TIR y PRI del PíEE, se procede a determinar la modalidad de financiamiento del PíEE; que incluye entre otras:

- Financiamiento con capital propio.
- Financiamiento por banca privada (préstamo).
- Financiamiento mixto (capital propio y banca privada).
- Financiamiento en modelo ESCO.

Los PíEE con bajo flujo de caja pero con un interesante impacto en los ahorros, se financian normalmente con un préstamo (banca privada). En cambio, los PíEE con alto flujo de caja suelen ser financiados con capital propio o financiamiento mixto, debido a que el flujo permite que la inversión se recupere rápidamente.

4.5 Manual de Eficiencia Energética para minería

El presente manual contiene una metodología para análisis de oportunidades y medidas de eficiencia energética para minería, junto a una metodología para construcción del proyecto de inversión en eficiencia energética para minería.

4.5.1 Análisis del consumo energético

El objetivo es presentar los aspectos relacionados con la caracterización energética de la empresa, se deben realizar las siguientes actividades:

- a. Identificar fuentes de energía: Completar formulario presentado en Tabla 4.3.
- b. Identificar gastos monetarios: Completar formulario presentado en Tabla 4.4.
- c. Determinar indicadores energéticos: Completar formulario presentado en Tabla 4.5.

4.5.2 Análisis del uso energético

El objetivo es conocer el flujo de energía dentro de los sistemas energéticamente relevantes de la empresa, y en que se utiliza la energía. Se deben realizar las siguientes actividades:

- a. Identificar los sistemas energéticamente relevantes: Completar el formulario presentado en la Tabla 4.6.
- b. Identificar los usos energéticos: Completar el formulario presentado en la Tabla 4.7.
- c. Elaborar diagramas de flujos y balances de energía.

4.5.3 Análisis de oportunidades y medidas de EE

El objetivo es encontrar una amplia gama de oportunidades de EE y determinar la factibilidad técnico-económica de las medidas de EE. Se deben realizar las siguientes actividades:

- a. Definir equipos que son relevantes para el consumo energético. Completar el formulario presentado en la Tabla 4.8.
- b. Identificar factores que influyen en el consumo energético.
- c. Determinar oportunidades y medidas de EE.
- d. Determinar ahorro energético, ahorro monetario e inversiones de cada medida. Completar formulario presentado en la Tabla 4.9.
- e. Realizar flujos de ahorros de cada medida de EE. Completar el formulario presentado en la Tabla 4.10.
- f. Priorizar medidas de EE: Completar el formulario presentado en la Tabla 4.11

4.5.4 Construcción del proyecto de inversión en EE

El objetivo es determinar el conjunto de MEE que integran el PíEE y determinar la factibilidad económica del PíEE. Se deben realizar las siguientes actividades:

- Seleccionar subconjunto de MEE que integran el PíEE. Completar formulario presentado en la Tabla 4.12.
- Determinar inversiones del PíEE. Completar formulario presentado en la Tabla 4.12.
- Evaluar impacto productivo del PíEE (efecto del PíEE en los costos operacionales).
- Evaluar estructura de costo de producción del PíEE.
- Realizar evaluación económica del PíEE. Completar formulario presentado en la Tabla 4.13, en la Tabla 4.14 y en la Tabla 4.15 para realizar flujo de caja sin proyecto, con proyecto y flujo marginal respectivamente.
- Determinar modalidad de financiamiento del PíEE.

Tabla 4.3: Formulario para realizar identificación de fuentes de energía

Fuente de energía	Cantidad Física	Unidad	Factor de conversión	Unidad	Contenido energético	Unidad	% del consumo total de energía
Electricidad		[kWh]		[kWh/kWh]		[kWh]	
Diésel		[L]		[kWh/L]		[kWh]	
Enap 6		[L]		[kWh/L]		[kWh]	
Gas natural		[m ³]		[kWh/m ³]		[kWh]	
Total						[kWh]	100%

Fuente: Elaboración propia adaptado de [15]

Tabla 4.4: Formulario para realizar identificación de gastos monetarios

Fuente de energía	Cantidad Física	Unidad	Gastos monetario [\$]	Precio específico	Unidad	% de los gastos energéticos
Electricidad		[kWh]			[\$/kWh]	
Diésel		[L]			[\$/L]	
Enap 6		[L]			[\$/L]	
Gas natural		[m ³]			[\$/m ³]	
Total					Total	100%

Fuente: Elaboración propia adaptado de [15]

Tabla 4.5: Formulario para los indicadores determinados (TMF: Tonelada métrica fina)

Indicador	Descripción	Estado actual	Valor referencial	Meta	Unidad
Consumo específico	Energía consumida por TMF de Cu producido				[kWh/TMF]
Intensidad energética	Energía consumida por ventas				[kWh/\$]
Gasto energético	Gasto energético por TMF de Cu producido				[\$/TMF]

Fuente: Elaboración propia adaptado de [15]

Tabla 4.6: Formulario de identificación de SER

Proceso	Proceso específico	SER	Equipos	Consumo Energético [kWh]
Mina	Transporte	Sistemas motrices de combustión interna	Camiones de carga de alto tonelaje	
			Equipos de generación de electricidad	
		Sistemas motrices eléctricos	Camiones eléctricos de alto tonelaje	
Concentradora	Chancado primario y Molienda	Sistemas motrices eléctricos	Correas transportadoras	
			Chancadores	
			Molinos	
			Bombas hidráulicas	
	Flotación	Sistemas motrices eléctricos	Compresores	
Bombas hidráulicas				
Fundición	Fusión	Sistemas para generar calor directo	Hornos de fusión	
	Piro-refinación	Sistemas para generar calor directo	Horno de refinería	
Refinación	Electro-refinación	Sistemas electroquímicos	Celdas de electro-refinación	
		Sistemas de caldera	Caldera de agua	
LxSxEw	Lixiviación	Sistemas motrices eléctricos	Bombas hidráulicas	
	Extracción por solventes	Sistemas motrices eléctricos	Bombas hidráulicas	
			Bombas hidráulicas	
	Electro-obtención	Sistemas electroquímicos	Celdas de electro-obtención	
			Sistemas de caldera	Caldera de agua

Fuente: Elaboración propia adaptado de [15]

Tabla 4.7: Principales usos energéticos en minería

Clasificación	Uso	Consumo energético [kWh]
Usos térmicos	Fundir mineral.	
	Refinar ánodo de cobre.	
	Calentar electrolito.	
	Secado de concentrado.	
Usos mecánicos	Transporte de mineral sólido.	
	Transporte de mineral húmedo.	
	Alimentar con agua procesos.	
	Agitar y separar cobre para formar concentrado.	
	Triturar.	
	Moler.	
	Separar óxidos de cobre del resto del mineral estéril.	
	Aumentar concentración de cobre en electrolito.	
	Producir cátodo de alta pureza.	

Fuente: Elaboración propia adaptado de [15]

Tabla 4.8: Formulario de equipos energéticamente relevantes

Equipo	Proceso	Cantidad	Potencia Unitaria [W]	Potencia Total [W]	Tiempo de operación total [h]	Energía Total [kWh]

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.9: Determinación de ahorro energético y monetario de cada medida de EE

Ítem	Medida de EE	Ahorro energético [kWh]	Precio Específico	Unidad	Factor de conversión	Unidad	Ahorro monetario [\$]	Inversión [\$]
	Total					Total		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.10: Formulario estándar para desarrollo de valoración económica de cada MEE

Año	0	1	2	...	20
Ahorro					
Inversión					
Flujo de Ahorros Neto					

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.11: Formulario de comparación de MEE según indicadores económicos

Nº	Costo de la medida (\$)	Tarifa usada para cálculo de Beneficios energéticos (\$/unidad)	(unidad)	Beneficios anuales energéticos (\$/a)	PRI simple (años)	VAN (\$)	TIR (%)	Beneficios acumulados vida útil (\$)
1.								
	\$ 0	Electricidad			Electricidad		Electricidad	
	\$ 0	Combustible			Combustible		Combustible	
	\$ 0	TOTAL			TOTAL		TOTAL	

Fuente: [15]

Tabla 4.12: Determinación de ahorros energéticos y monetarios de cada MEE integrada en el PIEE

Ítem	Medida de EE	Ahorro energético [kWh]	Precio Específico	Unidad	Factor de conversión	Unidad	Ahorro monetario [\$]	Inversión [\$]
	Total					Total		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.13: Formulario para flujos de caja de la situación sin proyecto de EE

Ítem/Años	0	1	2	...	20
Ingresos					
Producción					
Precio Promedio					
Ingresos Totales					
Egresos					
Costo de producción excepto energía					
Costo de energía					
Amortización					
Depreciación					
Egresos Totales					
Utilidad antes de impuesto					
Impuesto a las utilidades (20%)					
Utilidad después de impuesto					
Depreciación					
Flujo de caja neto					

Fuente: [23]

Tabla 4.14: Formulario para flujos de caja de la situación con proyecto de EE

Ítem/Años	0	1	2	...	20
Ingresos					
Producción					
Precio Promedio					
Ingresos Totales					
Egresos					
Costo de producción excepto energía					
Costo de energía					
Amortización					
Depreciación					
Egresos Totales					
Utilidad antes de impuesto					
Impuesto a las utilidades (20%)					
Utilidad después de impuesto					
Depreciación					
Inversiones para:					
MEE eléctricas					
MEE térmicas					
Otras inversiones					
Flujo de caja neto					

Fuente: [23]

Tabla 4.15: Formulario para flujos de caja marginal del proyecto de EE

Ítem/Años	0	1	2	...	20
Ingresos					
Producción					
Precio Promedio					
Ingresos Totales					
Egresos					
Costo de producción excepto energía					
Costo de energía					
Amortización					
Depreciación					
Egresos Totales					
Utilidad antes de impuesto					
Impuesto a las utilidades (20%)					
Utilidad después de impuesto					
Depreciación					
Inversiones para:					
MEE eléctricas					
MEE térmicas					
Otras inversiones					
Recuperación de la inversión					
Flujo de caja neto					

Fuente: [23]

4.6 Ejemplo: Gestión de carga en camiones de alto tonelaje

En la sección 4.2.4 se mencionan oportunidades de EE en proceso de transporte en camiones de alto tonelaje, específicamente el menor consumo de combustible gestionando la carga del camión. En este capítulo se explica, mediante el análisis de dos modelos de camiones mineros, cómo varía el consumo de combustible al variar la carga que transporta un camión al subir un camino de mina rajo abierto durante 1 año.

La tasa de consumo de combustible (t_{cc}) se define por la ecuación (4.3).

$$t_{cc} = \frac{P_m}{10^6 \cdot C_p \cdot \eta_{comb}} \cdot 3600 \quad (4.3)$$

Donde:

t_{cc} : Tasa de consumo de combustible [L/h]

P_m : Potencia entregada por el motor [W]

C_p : Poder calorífico del diésel [MJ/L]

η_{comb} : Rendimiento de combustión

La potencia entregada por el motor se define por la ecuación (4.4).

$$P_m = \frac{P_t}{\eta_{trans}} \quad (4.4)$$

Donde:

P_t : Potencia entregada a las ruedas [W]

η_{trans} : Rendimiento de transmisión

La potencia entregada a las ruedas se define por la ecuación (4.5).

$$P_t = \frac{P_r}{\eta_{ruedas}} \quad (4.5)$$

Donde:

P_r : Potencia de empuje [W]

η_{ruedas} : Rendimiento de ruedas

La potencia de empuje se define por la ecuación (4.6).

$$P_r = v \cdot R \quad (4.6)$$

Donde:

v : Velocidad del camión [m/s]

R : Fuerza de tracción en las ruedas [N]

La fuerza de tracción en las ruedas se obtiene de los gráficos de rendimiento en subida de pendiente/velocidad/fuerza de tracción. En la Figura 4.26 se presenta el gráfico para

el modelo 785C de Caterpillar, utilizado para obtener la fuerza a la tracción con una resistencia total de 10%. La línea azul corresponde a una carga del 80% de la carga útil, la rosada al 90%, roja 100%, café 110% y morada 120%. En el Anexo C se encuentran el resto de los gráficos utilizados en el ejemplo, los cuales corresponde a modelo 785C con resistencia total de 15%, modelo 789D con pendiente total de 10% y 15%.

Para determinar el rendimiento en subida de pendientes se lee el gráfico comenzando por el peso bruto, luego se desciende en línea recta hasta el porcentaje de la resistencia total. Éste es igual al porcentaje real de la pendiente más la resistencia a la rodadura (tabulado según tipo de suelo). A partir de la intersección, se traza una línea horizontalmente hasta la curva con la marcha más elevada que se pueda obtener. Si se continúa horizontalmente se obtiene la fuerza de tracción utilizable, si desciende verticalmente se obtiene la velocidad máxima.

El tiempo de subida por cada carga se define por la ecuación (4.7).

$$t = \frac{d}{v} \quad (4.7)$$

Donde:

t : Tiempo de subida por cada carga [s]

d : Distancia de acarreo en subida [m]

El consumo de combustible por carga se define por la ecuación (4.8).

$$C_c = \frac{t \cdot t_{cc}}{3600} \quad (4.8)$$

Donde:

C_c : Consumo de combustible por carga [L]

El número de viajes anual se define por la ecuación (4.9).

$$N = \frac{T_a}{C_{cam}} \quad (4.9)$$

Donde:

N : Número de viajes anuales

T_a : Mineral a transportar anualmente [kg]

C_{cam} : Capacidad de carga del camión [kg]

El consumo de combustible anual se define por la ecuación (4.10).

$$C = N \cdot C_c \quad (4.10)$$

Donde:

C : Consumo de combustible anual [L]

Consideraciones del ejemplo:

- Mineral a transportar anualmente: 20.000.000 [Ton/año].
- Camino de tierra, relativamente suave, mantenido y regado. Lo que implica una resistencia a la rodadura de 3,5% [20].
- Pendiente porcentual: 6,5% y 11,5%.
- Distancia de acarreo: 2.000 [m].
- Rendimiento de ruedas: 40% [23].
- Rendimiento de transmisión: 95%.
- Rendimiento de combustión: 40%.
- Poder calorífico del combustible: 38,6 [MJ/L].
- Flota con camiones modelo: 785C y 789D.

En la Tabla 4.16, Tabla 4.17, Tabla 4.18, Tabla 4.19, se presentan los resultados obtenidos para el modelo 785C y 789D con resistencia total 10% y 15%.

Tabla 4.16: Resultados para Modelo 785C con resistencia total 10%

Carga [%carga útil]	Fuerza de tracción [N]	Velocidad [km/h]	Consumo de combustible [L/año]	Diferencia de combustible respecto 100% de carga útil [L]
80	216.323	15,0	11.988.260	724.868
90	238.961	14,0	11.771.417	508.025
100	254.053	12,8	11.263.392	0
110	274.176	11,5	11.050.491	- 212.900
120	301.307	11,0	11.131.959	- 131.433

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.17: Resultados para Modelo 785C con resistencia total 15%

Carga [%carga útil]	Fuerza de tracción [N]	Velocidad [km/h]	Consumo de combustible [L/año]	Diferencia de combustible respecto a 100% de carga útil [L]
80	327.000	11,0	18.121.789	1.530.281
90	348.800	10,0	17.182.145	590.637
100	374.233	8,0	16.591.507	0
110	409.345	7,0	16.498.317	- 93.190
120	445.017	6,5	16.441.408	- 150.099

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.18: Resultados para Modelo 789D con resistencia total 10%

Carga [%carga útil]	Fuerza de tracción [N]	Velocidad [km/h]	Consumo de combustible [L/año]	Diferencia de combustible respecto a 100% de carga útil [L]
80	282.143	15,8	11.897.216	1.128.324
90	300.000	15,2	11.244.626	475.734
100	319.231	14,8	10.768.892	0
110	334.615	14,2	10.261.704	- 507.187
120	353.846	13,8	9.947.169	- 821.722

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.19: Resultados para Modelo 789D con resistencia total 15%

Carga [%carga útil]	Fuerza de tracción [N]	Velocidad [km/h]	Consumo de combustible [L/año]	Diferencia de combustible respecto a 100% de carga útil [L]
80	414.615	11,8	17.483.231	1.524.511
90	440.769	11,0	16.520.950	562.231
100	473.077	9,8	15.958.719	0
110	496.153	8,4	15.215.630	- 743.088
120	526.923	7,6	14.812.632	- 1.146.086

Fuente: Elaboración propia

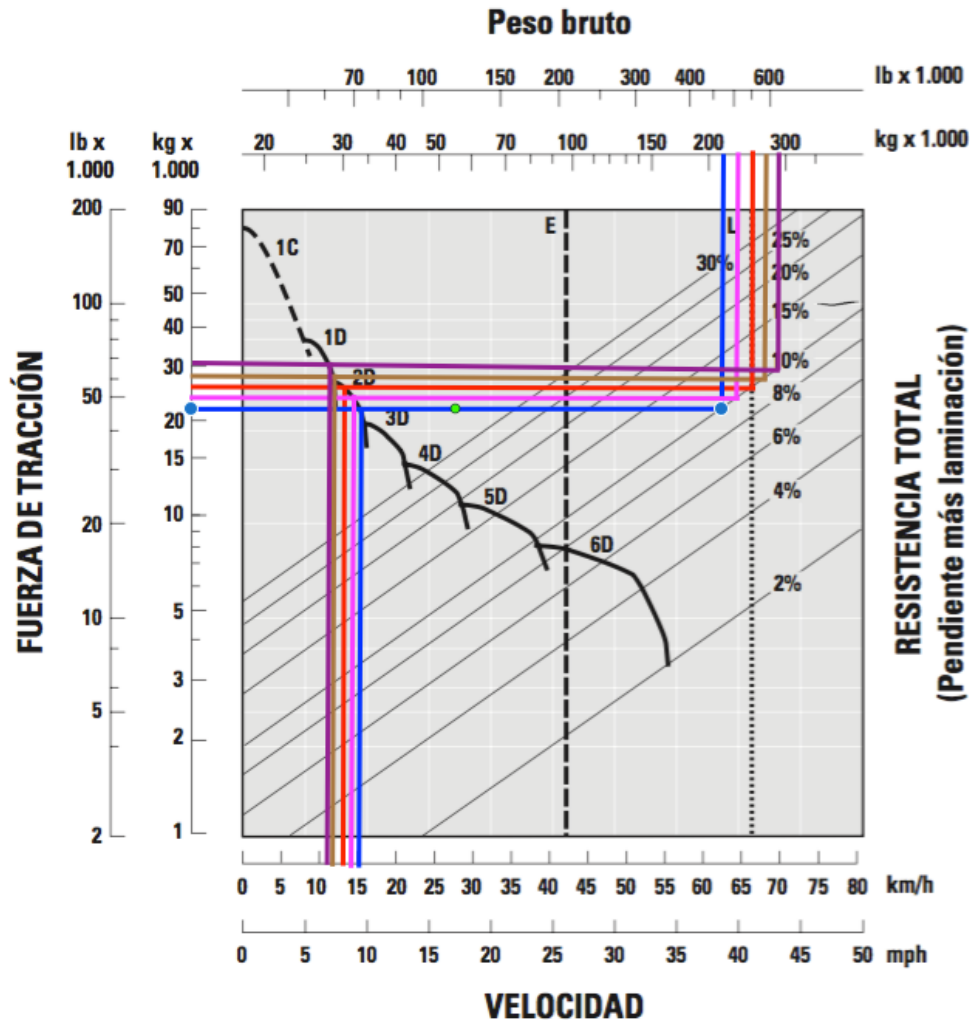


Figura 4.26: Rendimiento en subida de pendiente/velocidad/fuerza de tracción

Fuente: Elaboración propia adaptado de [24]

Para ambos modelos de camiones se observa que al disminuir la carga de mineral en el camión se tiene un mayor consumo de combustible anual, en cambio, al aumentar la carga de mineral se tiene un menor consumo de combustible anual. Analizando detalladamente se tiene que:

- Para el modelo 785C, con 80% de carga, aumenta el consumo en 6,4% y 9,2% para una resistencia total de 10% y 15% respectivamente; para 90% de carga, aumenta el consumo en 4,5% y 3,6% respectivamente.

- Para el modelo 785C, con 110% de carga, disminuye el consumo en 1,9% y 0,6% para una resistencia total de 10% y 15% respectivamente; para 120% de carga, disminuye el consumo en 1,2% y 0,9% respectivamente.
- Para el modelo 789D, con 80% de carga, aumenta el consumo en 10,5% y 9,5% para una resistencia total de 10% y 15% respectivamente; para 90% de carga, aumenta el consumo en 4,4% y 3,5% respectivamente.
- Para el modelo 789D, con 110% de carga, disminuye el consumo en 4,7% y 4,6% para una resistencia total de 10% y 15% respectivamente; para 120% de carga, disminuye el consumo en 7,6% y 7,2% respectivamente.

En la Tabla 4.20 se presenta los costos anuales considerando que:

- La flota de camiones trabaja durante todo el periodo con carga constante.
- La flota de camiones posee solo un modelo de camión.
- Precio del litro de combustible diésel a 0,63 [USD] [26]

Tabla 4.20: Costos anuales por modelo de camión para porcentajes de carga

Carga [%carga útil]	Modelo 785C con 10% resistencia total [USD/año]	Modelo 785C con 15% resistencia total [USD/año]	Modelo 789D con 10% resistencia total [USD/año]	Modelo 789D con 15% resistencia total [USD/año]
80	7.552.603	11.416.727	7.495.246	11.014.435
90	7.415.992	10.824.751	7.084.114	10.408.198
100	7.095.937	10.452.649	6.784.401	10.053.992
110	6.961.809	10.393.939	6.464.873	9.585.847
120	7.013.134	10.358.087	6.266.716	9.331.958

Fuente: Elaboración propia

Para ambos modelos de camiones se observa que:

- Los costos por combustibles aumentan al disminuir la carga del camión.
- Los costos por combustibles aumentan al aumentar la resistencia total.

En la Tabla 4.21 se presenta el aumento o ahorro de costos de combustible por kilotonelada de mineral transportado por kilómetro de distancia de acarreo anual.

Tabla 4.21: Ahorro o aumento de costos anuales por kilo-tonelada de mineral transportado y por kilómetro de distancia de acarreo por modelo de camión para porcentajes de carga

Carga [%carga útil]	Modelo 785C con 10% resistencia total [USD/año/kton/km]	Modelo 785C con 15% resistencia total [USD/año/kton/km]	Modelo 789D con 10% resistencia total [USD/año/kton/km]	Modelo 789D con 15% resistencia total [USD/año/kton/km]
80	11,42	24,10	17,77	24,01
90	8,00	9,30	7,49	8,86
100	0,00	0,00	0,00	0,00
110	-3,35	-1,47	-7,99	-11,70
120	-2,07	-2,36	-12,94	-18,05

Fuente: Elaboración propia

Para una flota de camiones se observa que los mayores ahorros se alcanzan con un aumento de la carga en un 20% de la carga útil. En cambio, los mayores costos se tienen para una disminución de la carga en un 20% de la carga útil.

4.6.1 Caso real: División Gabriela Mistral (Mina Gaby)

Descripción del proyecto [27]:

- Mineral a transportar anual: 51 millones de toneladas año.
- Profundidad máxima del rajo: 270 [m].
- Pendiente máxima de caminos: 10°.

Consideraciones para el ejemplo:

- Camino de tierra, relativamente suave, mantenido y regado. Lo que implica una resistencia a la rodadura de 3,5% [20].
- Pendiente porcentual: 11,5% (Equivale a pendiente de 6,6° aproximadamente para los caminos).
- Rendimiento de ruedas: 40% [24].
- Rendimiento de transmisión: 95%.
- Rendimiento de combustión: 40%.
- Poder calorífico del combustible: 38,6 [MJ/L].
- Flota de camiones: Modelo 789D.
- Distancia de acarreo: 2360 [m]

Utilizando los resultados de la Tabla 4.21 para modelo 789D con 15% resistencia total se obtiene:

- Cargar los camiones con un 80% de carga útil genera aproximadamente un aumento de costos por consumo de combustible en 2.890.000 [USD] con respecto a cargar con un 100% de carga útil.
- Cargar los camiones con un 90% de carga útil genera aproximadamente un aumento de costos por consumo de combustible en 1.067.000 [USD] con respecto a cargar con un 100% de carga útil.

5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

5.1 Discusión

A continuación se presentan las discusiones de los resultados obtenidos en el presente trabajo.

Los documentos de comparación para el manual de EE son:

- CODELCO, 2006, “Manual de eficiencia energética en proyectos de inversión”, Dirección de eficiencia energética, Santiago [28].
- AChEE, 2013, “Manual de gestor energético, Sector hotelero”, Santiago [29].
- AChEE, 2013, “Manual de gestor energético, Sector hospitalario”, Santiago [30].
- AChEE, 2014, “Guía metodológica de eficiencia energética en proyectos de inversión”, Santiago [31].

La estructura del manual de EE propuesto en esta memoria corresponde a lo estandarizado por la AChEE, la cual se observa en [29] y [30]. Esta corresponde a: i) Caracterizar usos y consumos energéticos; ii) Oportunidades y necesidades de mejora en EE; y iii) Metodología para metodologías de EE a implementar. Además, en el manual propuesto en este trabajo se integra la metodología de construcción de PíEE, la cual se encuentra estandarizada en [31].

Las principales diferencias del manual propuesto con respecto a los manuales referidos en el párrafo anterior corresponden a:

- No se integra el capítulo de conceptos básicos de energía y eficiencia energética, debido a que se asume que los usuarios del manual presentan una mínima base teórica con respecto a estos temas.
- Con respecto a los manuales [29] y [30], terminan con la factibilidad técnico-económica de las MEE independientemente. Es decir, no se presenta una metodología para construir el PíEE.

Realizando la comparación del manual de EE propuesto y el manual de EE de CODELCO [28] se tiene que:

- El manual de EE de CODELCO [28] no presenta caracterización de los SER, ni de los consumos y usos energéticos.
- La metodología para análisis de oportunidades y MEE del manual propuesto está desarrollada de manera general, lo cual permite ser implementada para cualquier proceso productivo de la planta. En cambio, el manual de CODELCO [28], presenta una metodología por proceso productivo sin entrar en mayor detalle.
- El manual propuesto en este trabajo tiene su énfasis en identificar oportunidades y proponer MEE para poder reducir el consumo de energía o aumentar la productividad

de la empresa. El manual de CODELCO [28] está más enfocado en los entregables de ingeniería.

- El manual propuesto en este trabajo es conciso, presenta las actividades a desarrollar y formularios para realizar la metodología en un capítulo y la explicación en otro manteniendo la misma estructura. En cambio, el manual de CODELCO [28] es de mayor extensión (aproximadamente 3 veces lo presentado en este trabajo) lo que dificulta la lectura y el desarrollo de las actividades.
- La manual de EE propuesto en este trabajo es flexible según el detalle de información que se tenga. Está considerado para análisis con bajos recursos, como fue el caso de este trabajo de título, y con toda la información relevante que tenga la empresa. El manual de CODELCO, requiere tener información detallada de los procesos de la planta (planos, datos de placa, etc.).

Con respecto a las oportunidades y MEE identificadas:

- Los estudios realizados dan como resultado, en su mayoría, mejoras operacionales de los equipos con estimaciones de ahorro energético con un gran margen de error.
- La oportunidad más importante que no se relaciona con una mejor gestión de los procesos, es la implementación del molino rodillo de alta presión para el proceso de conminución. Se propone realizar un estudio más profundo para determinar con mayor detalle los posibles ahorros energéticos, que en primera instancia son altos, 25% menos de consumo que un chancador cónico [17].

Con respecto al ejemplo de gestión de carga en camiones de alto tonelaje desarrollado en el presente trabajo:

- El ejemplo busca corroborar la factibilidad técnica de la oportunidad de disminución de consumo de combustible gestionando la carga de los camiones [20]. No corresponde a un ejemplo de la metodología propuesta para construir el PíEE.
- Los resultados de consumo de combustible del presente informe concuerdan con el comportamiento esperado según ETAG [20]. Al aumentar la carga del camión con respecto a su carga útil, disminuye el consumo de combustible; y al contrario, al disminuir la carga del camión con respecto a su carga útil, aumenta el consumo de combustible.
- El ahorro o aumento porcentual de consumo de combustible obtenido en el ejemplo desarrollado es aproximadamente la mitad con respecto a [20]. Esto se puede deber a que el ejemplo desarrollado sólo considera el consumo de combustible al subir mineral desde el rajo, mientras que [20] considera todo el ciclo de trabajo del camión. Por lo tanto, se recomienda realizar un estudio más detallado considerando todas las etapas del ciclo de un camión; las cuales corresponde a: carga, transporte con carga, descarga y transporte sin carga.

- El caso real se desarrolla para la división Gabriela Mistral de CODELCO debido a que posee el 100% de su flota de camiones con control automático [32], lo cual permite tener una mejor gestión de la carga y velocidad de operación.

5.2 Conclusiones

De acuerdo a los estudios y desarrollos considerados en este proyecto se concluye que:

- La caracterización de sistemas de consumo de energía (en contexto de minería del cobre) se realiza mediante una primera clasificación de fuente de energía (combustible y electricidad), luego una subdivisión por el tipo de uso que tienen los equipos:
 - Los sistemas de combustible se dividen en sistemas motrices de combustión interna, sistemas para generar calor directo y sistemas de calderas. Los principales equipos consumidores de energía corresponden a camiones de carga de alto tonelaje, hornos de fusión y calderas para calentar electrolito indirectamente.
 - Los sistemas de electricidad se dividen en sistemas motrices y sistemas electroquímicos, los primeros son los que representan el mayor consumo debido a los sistemas de bombeo, molinos y chancadores.
- Las principales oportunidades de EE identificadas corresponden a los procesos de conminución y transporte, los cuales además corresponden a los de mayor consumo energético. Se destacan:
 - La implementación de molino de rodillos de alta presión, el cual ha obtenido resultados de disminución de consumo entre 15% a 25% frente a chancadores cónicos posteriores al molino SAG. El gran potencial de este equipo ha llevado a estudiar la posibilidad de reemplazar incluso al molino SAG, lo cual produciría una reducción considerable dentro de los consumos de electricidad.
 - La gestión de carga útil y la velocidad de los camiones, en donde una variación del 10% y 20% de la carga total permite traslados con mayor velocidad y mayor cantidad de viajes para lograr desplazar la misma cantidad de mineral anualmente, lo que puede producir un aumento del 10% en combustible, según ejemplo desarrollado.
 - La mayoría de las oportunidades corresponden a mejora en la gestión y control de los parámetros de operación. Por lo tanto, se requiere de un amplio conocimiento propio de la faena sobre sus procesos; debido a que cada planta prácticamente es única por las propiedades del material que trabaja y las condiciones ambientales, entre otros factores.
- La metodología para análisis de oportunidades y medidas de eficiencia energética tiene el objetivo de encontrar oportunidades de EE, para luego determinar la factibilidad técnico-económica de las MEE. Consiste en:

- Análisis del consumo energético, el cual busca determinar el perfil de demanda energética de la faena. En esta etapa se deben identificar las fuentes de energía; identificar los gastos monetarios; y determinar los indicadores energéticos.
 - Análisis de uso energético, el cual tiene como finalidad identificar en que se usa la energía y los flujos durante los procesos. En esta etapa se deben identificar los SER; identificar los usos energéticos; y elaborar diagramas de flujo de energía y balances energéticos.
 - Análisis de oportunidades y MEE, el que permite conocer el comportamiento de los equipos y los factores que afectan su consumo, logrando identificar pérdidas de energía o mejora en los procesos (oportunidades de EE), para luego determinar MEE con su respectiva factibilidad técnico-económica. En esta etapa se deben definir los equipos que son relevantes para el consumo energético, identificar los factores que influyen en el consumo energético, determinar oportunidades y MEE, determinar ahorros energéticos y monetario de cada MEE, realizar flujos de ahorro de cada MEE y priorizar MEE mediante los indicadores económicos según criterios de la empresa.
- iv. La metodología para construcción del proyecto de inversión en EE (PIEE) es un conjunto de MEE para implementar en la empresa. Esta consiste en:
- Seleccionar un subconjunto de MEE que integran el PIEE.
 - Determinar inversiones del PIEE.
 - Evaluar impacto productivo del PIEE.
 - Evaluar estructura de costo de producción del PIEE.
 - Realizar evaluación económica del PIEE.
 - Determinar modalidad de financiamiento del PIEE.
- vi. El ejemplo de gestión de flota de camiones muestra un alto impacto en los costos operacionales de la planta, refleja que disminuir la carga por debajo de la capacidad de diseño es ineficiente pues aumenta el consumo de combustible. En efecto, para una operación similar a la de la minera Gaby, cargar un camión bajo el 100% de su carga útil puede producir aumento de los costos de combustibles entre USD\$ MM 1 - USD\$ MM 3 por año.
- vii. El trabajo desarrolla un texto guía de EE para minería, en el cual se describe un procedimiento que permite recolectar la información necesaria para conocer el comportamiento de la energía en la faena; de esta forma se pueden tomar decisiones que proporcionen reducciones en energéticos, disminuyendo los costos de operación, lo que repercute en una mejor competencia en el mercado internacional de cobre.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Agencia Chilena de Eficiencia Energética, «Guía para la calificación de consultores en eficiencia energética,» Chile, 2015.
- [2] Comisión Chilena del Cobre, «Información Estadística sobre el consumo de energía en la minería del cobre al 2014,» Chile, 2015.
- [3] Comisión Chilena del Cobre, «Producción chilena de cobre por producto,» Chile, 2015.
- [4] Banco Central de Chile, «Cuentas Nacionales de Chile PIB Regional 2014,» Chile, 2015.
- [5] Ministerio de Energía, «Balance Nacional de Energía 2013,» Chile, 2014.
- [6] Servicio Nacional de Geología y Minería, «Atlas de Faenas Mineras, Regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá,» Chile, 2011.
- [7] Servicio Nacional de Geología y Minería, «Atlas de Faenas Mineras, Regiones de Antofagasta y Atacama,» Chile, 2011.
- [8] Servicio Nacional de Geología y Minería, «Atlas de Faenas Mineras, Región de Coquimbo,» Chile, 2011.
- [9] Servicio Nacional de Geología y Minería, «Atlas de Faenas Mineras, Regiones de Valparaíso, Del Libertador Bernardo O'Higgins y Metropolitana de Santiago,» Chile, 2012.
- [10] Servicio Nacional de Geología y Minería, «Atlas de Faenas Mineras, Región del Maule, Región del Biobío, Región de la Araucanía, Región de los Ríos, Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo y Región de Magallanes y de la Antártica Chilena,» Chile, 2012.
- [11] Codelco, «Codelco Educa,» [En línea]. Available: <https://www.codelcoeduca.cl>. [Último acceso: Enero 2016].
- [12] Antofagasta Minerals, «Sustentabilidad,» [En línea]. Available: <http://www.aminerals.cl/mineria-sustentabilidad/casos-sustentables/planta-termsolar-tesoro/> . [Último acceso: Enero 2016].
- [13] Comisión Chilena del Cobre, «Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2014,» Chile, 2015.
- [14] Agencia Chilena de Eficiencia Energética, «Medición y Verificación en la Gestión de Proyectos de Eficiencia Energética,» Chile, 2015.
- [15] Agencia Chilena de Eficiencia Energética, «Formulario Auditorías Energéticas,» Chile, 2012.
- [16] V. Montenegro, «Ingeniería de procesos metalúrgicos - Tecnologías de Fusión,» Chile, 2014.
- [17] M. E. Schlesinger, M. J. King, K. C. Sole y W. G. Davenport, Extractive Metallurgy of Copper, 5th edición ed., Elsevier, 2011.
- [18] Wikipedia, «Horno de Reverbero,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Horno_de_reverbero. [Último acceso: 26 Marzo 2016].
- [19] S. Courtin, «Apunte para el curso Laboratorio de Máquinas,» Chile, 2006.
- [20] Department of Resources, Energy and Tourism - Australian Government, «Energy Efficiency Opportunities,» 2010.

- [21] C. R. Delgado Robles, «Evaluación de un cambio tecnológico para el procesamiento de minerales de alta dureza,» Chile, 2013.
- [22] Innovatec, «Guía Técnica Auditoría de Eficiencia Energética en Industrias,» Chile, 2015.
- [23] C. N. Donoso, «Estudios de pre inversión para desarrollar eficiencia energética en una planta industrial típica,» *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico*, 2013.
- [24] Universidad de Chile, «Generalidades acerca del manejo de minerales,» Apunte del curso MI57E "Explotación de Minas", Chile, 2007.
- [25] Caterpillar, «Folleto del modelo 785C,» [En línea]. Available: <http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C652180>. [Último acceso: 22 Abril 2016].
- [26] Global Petrol Prices, «Precios del diésel,» [En línea]. Available: http://es.globalpetrolprices.com/Chile/diesel_prices/. [Último acceso: 9 Mayo 2016].
- [27] CODELCO CHILE, «Descripción del proyecto,» de *EIA Proyecto Gaby*, Santiago, 2002.
- [28] CODELCO, «Manual de Eficiencia Energética en proyectos de inversión,» *Dirección de eficiencia energética*, Octubre 2006.
- [29] Agencia Chilena de Eficiencia Energética, «Manual de Gestor Energético,» *Sector hotelero*, Octubre 2013.
- [30] Agencia Chilena de Eficiencia Energética, «Manual de Gestor Energético,» *Sector hospitalario*, Octubre 2013.
- [31] Agencia Chilena de Eficiencia Energética, «Guía metodológica de eficiencia energética en proyectos de inversión,» 2014.
- [32] CODELCO, «División Gabriela Mistral,» [En línea]. Available: https://www.codelco.com/division-gabriela-mistral/prontus_codelco/2016-02-25/162141.html. [Último acceso: 9 Mayo 2016].

7 ANEXOS

ANEXO A: Especificaciones técnicas de camión de alto tonelaje tracción por combustión interna	64
ANEXO B: Especificaciones técnicas de chancadores y molinos en operación.....	72
ANEXO C: Gráficos utilizados para obtener fuerza de tracción y velocidad en ejemplos de gestión de carga útil de camiones.....	76

ANEXO A: Especificaciones técnicas de camión de alto tonelaje tracción por combustión interna

Especificaciones del Camión Minero 785C

Motor		Especificaciones de operación		Frenos				
Modelo de motor	Cat® 3512B-EUI	Capacidad de carga útil nominal	136 tons métricas	150 tons EE.UU.	Superficie de freno – delantera	61.270 cm ² 9.497 pulg ²		
Potencia nominal	1.750 rpm	Capacidad SAE (2:1)	78 m ³	102 yd ³	Superficie de freno – trasera	89.729 cm ² 13.908 pulg ²		
Potencia bruta – SAE J1995	1.082 kW 1.450 hp	Velocidad máxima – cargado	55 km/h	34 mph	Normas	SAE J1473 OCT90 ISO 3450-1985		
Potencia neta – SAE J1349	1.005 kW 1.348 hp	Capacidad máxima	Personalizado		• Peso en orden de trabajo máximo hasta 249 480 kg (550.000 lb).			
Potencia neta	1.005 kW 1.348 hp	Capacidad a ras máxima (SAE)	Personalizado					
Potencia neta – Cat	1.005 kW 1.348 hp	Ángulo de dirección	36°		Dispositivos de levantamiento de cajas			
Potencia neta – ISO 9249	1.005 kW 1.348 hp	Diámetro de giro – delantero	27,5 m	90 pies 2 pulg	Flujo de la bomba – velocidad alta en vacío	750 L/min 198 gal EE.UU./min		
Potencia neta – 80/1269/EEC	1.005 kW 1.348 hp	Tiempo de levantamiento	15,2 segundos		Configuración de la válvula de alivio – levantamiento	17.238 kPa 2.500 lb/pulg ²		
Reserva de par	23%	Tiempo de bajada	15,9 segundos		Tiempo de levantamiento de la caja – velocidad alta en vacío	15,2 segundos		
Perforación	170 mm 6,7 pulg	Diámetro de giro en espacio libre de la máquina	30,6 m	100 pies 5 pulg	Tiempo de bajada de la caja – velocidad alta en vacío	15,9 segundos		
Carrera	190 mm 7,5 pulg	• Consulte la política sobre carga útil 10-10-20 del camión minero Cat para obtener información sobre las limitaciones del peso bruto máximo de la máquina.	Transmisión		Tiempo de bajada de la caja – posición libre	16,2 segundos		
Cilindrada	51,8 L 3.158 pulg ³		Avance 1	12,1 km/h	7,5 mph	Disminución de la potencia de la caja – velocidad alta en vacío	15,9 segundos	
<ul style="list-style-type: none"> • La potencia neta publicada es la potencia disponible a la velocidad nominal de 1.750 rpm, medida en el volante cuando el motor está equipado con ventilador, filtro de aire, silenciador y alternador. • Las clasificaciones están basadas en las condiciones de aire estándares de 25° C (77° F) y 99 kPa (29,32 Hg) en barómetro seco. La potencia está basada en el combustible que tiene una gravedad API de 35 a 16° C (60° F) y un LHV de 42.780 kJ/kg (18.390 BTU/lb) cuando se utiliza el motor a 30° C (86° F). • No se requiere reducción de potencia del motor hasta una altitud de 3.050 m (10.000 pies). • Según corresponda, el motor 3512B cumple los requisitos sobre emisiones de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. 	Pesos – aproximados		Avance 2	16,3 km/h	10,2 mph	• Cilindros hidráulicos dobles de dos etapas montados dentro del bastidor principal; cilindros de doble acción en la segunda etapa.		
	Peso bruto de la máquina en orden de trabajo	249.480 kg 550.000 lb	Mandos finales		Avance 3		22,2 km/h	13,8 mph
	Peso del chasis	74.450 kg 164.134 lb	Relación diferencial	2,10:1		Avance 4	29,9 km/h	18,6 mph
	Peso en orden de trabajo – vacío – caja de piso plano	102.150 kg 225.200 lb	Relación planetaria	10,83:1		Avance 5	40,6 km/h	25,2 mph
	Peso en orden de trabajo – vacío – piso de doble declive	95.725 kg 211.035 lb	Relación de reducción total	22,75:1		Avance 6	54,8 km/h	34 mph
			• Movimiento libre, planetario.	Suspensión		Retroceso	11 km/h	6,8 mph
				Carrera del cilindro eficaz – delantera	306,5 mm	12,1 pulg		
				Carrera del cilindro eficaz – trasera	165 mm	6,5 pulg		

Especificaciones del Camión Minero 785C

Pesos aproximados – piso de doble declive

Peso bruto – vacío	95.725 kg	211.035 lb
Chasis	74.450 kg	164.134 lb
Caja	21.258 kg	46.865 lb
Eje delantero – vacío	47%	
Eje trasero – vacío	53%	
Eje delantero – cargado	33%	
Eje trasero – cargado	67%	

Pesos aproximados – piso plano

Peso bruto – vacío	102.130 kg	225.200 lb
Chasis	74.450 kg	164.134 lb
Caja	25.687 kg	56.630 lb
Revestimiento estándar	1.996 kg	4.400 lb
Eje delantero – vacío	47%	
Eje trasero – vacío	53%	
Eje delantero – cargado	33%	
Eje trasero – cargado	67%	

- Los porcentajes representan la distribución del peso sin revestimiento.

Distribuciones del peso – aproximadas

Eje delantero – vacío	47%	
Eje trasero – vacío	53%	
Eje delantero – cargado	33%	
Eje trasero – cargado	67%	

Capacidad – piso de doble declive – factor de llenado del 100%

A ras	57 m ³	74 yd ³
Colmada (SAE 2:1)	78 m ³	102 yd ³

Capacidad – piso plano – factor de llenado del 100%

A ras	74 m ³	96 yd ³
Colmada (SAE 2:1)	91 m ³	119 yd ³

Capacidades de llenado de servicio

Tanque de combustible	1.893 L	500 gal EE.UU.
Sistema de enfriamiento	379 L	100 gal EE.UU.
Cárter	204 L	54 gal EE.UU.
Diferenciales y mandos finales	436 L	115 gal EE.UU.
Tanque de dirección	90 L	24 gal EE.UU.
Sistema de dirección (incluye tanque)	117 L	31 gal EE.UU.
Tanque hidráulico con frenos/dispositivo de levantamiento	337 L	89 gal EE.UU.
Sistema de frenos/dispositivo de levantamiento (incluye tanque)	641 L	169 gal EE.UU.
Convertidor de par/sistema de transmisión (incluye sumidero)	248 L	65,51 gal EE.UU.

ROPS

Normas de ROPS SAE J1040 APR88
ISO 3471:1994

- La ROPS (Estructura de Protección en Caso de Vuelcos) para la cabina ofrecida por Caterpillar cumple los criterios de la norma SAE J1040 APR88 e ISO 3471:1994 Nivel II para ROPS.

Sonido

Normas de sonido ANSI/SAE J1166
MAY90 SAE J88 APR95

- La exposición del operador al ruido Leq (nivel de presión de ruido equivalente) medido de acuerdo con los procedimientos del ciclo de trabajo especificados en la norma ANSI/SAE J1166 MAY90 es de 80 dB(A) para la cabina que ofrece Caterpillar, cuando esta se instala y mantiene correctamente, y se prueba con puertas y ventanas cerradas.
- El nivel de presión acústica exterior para la máquina estándar medido a una distancia de 15 m (49 pies) de acuerdo con los procedimientos de prueba especificados en la norma SAE J88 APR95, con la máquina operando a una marcha intermedia, es de 89 dB(A).
- Es posible que se necesite protección auditiva cuando se trabaja durante mucho tiempo en una estación del operador y una cabina abierta (si no cuentan con el mantenimiento correcto o tienen las puertas/ventanas abiertas), o en un entorno ruidoso.

Dirección

Normas de dirección SAE J1511 OCT90
ISO 5010:1992

- Diámetro de giro en la cadena de la rueda delantera con neumáticos estándares: 27,5 m (90 pies 2 pulg).
- Diámetro de giro en espacio libre de la máquina 30,6 m (100 pies 5 pulg).
- Ángulo de dirección, derecho o izquierdo: 36 grados.
- El sistema hidráulico separado evita la contaminación cruzada.

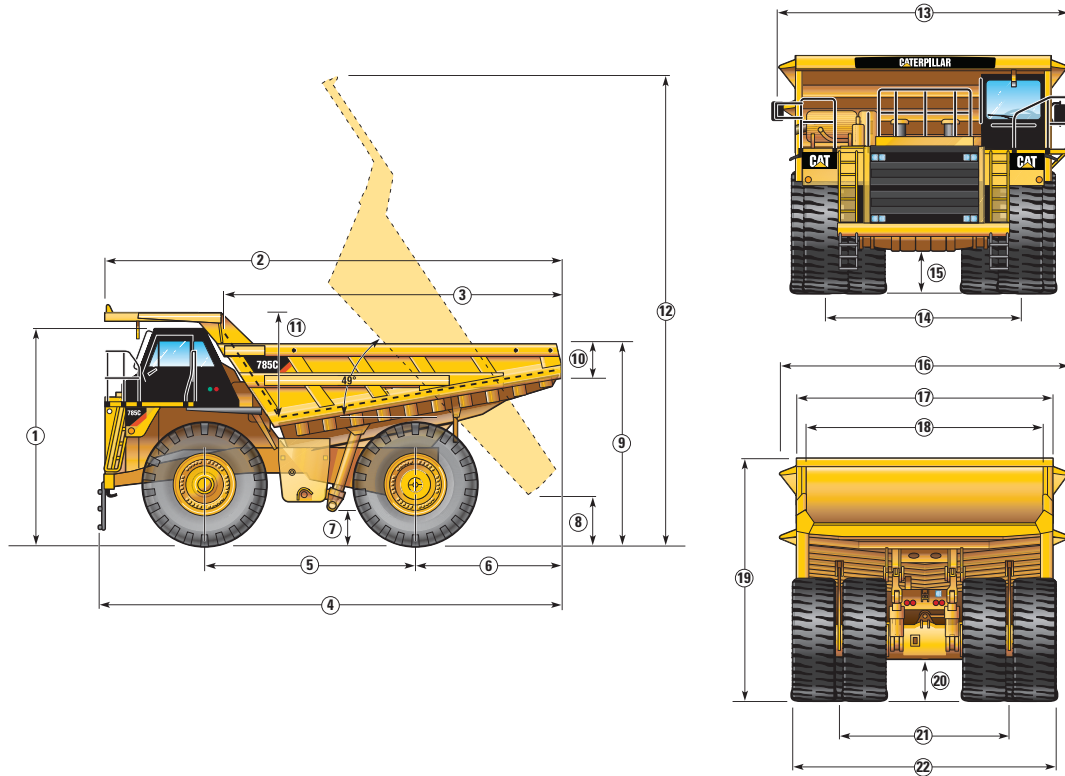
Neumáticos

Neumático estándar 33.00-R51 (E4)
33.00-R51 (E3)

- Las capacidades productivas del Camión Minero 785C son tales que, en ciertas condiciones de trabajo, las capacidades TKPH (TMPH) de los neumáticos estándares u optativos podrían excederse y, por lo tanto, limitar la producción.
- Caterpillar recomienda que el cliente evalúe todas las condiciones del trabajo y consulte al fabricante de los neumáticos para una selección adecuada de los neumáticos.

Dimensiones

Todas las dimensiones son aproximadas.



1	Altura hasta la parte superior de la ROPS	5.122 mm	16 pies 10 pulg
2	Longitud de la caja total	10.615 mm	34 pies 10 pulg
3	Longitud interior de la caja	7.652 mm	25 pies 2 pulg
4	Longitud total	11.024 mm	36 pies 3 pulg
5	Distancia entre ejes	5.182 mm	17 pies 0 pulg
6	Eje trasero a la cola	3.410 mm	11 pies 3 pulg
7	Espacio libre sobre el suelo	987 mm	3 pies 3 pulg
8	Espacio libre de descarga	1.284 mm	4 pies 3 pulg
9	Altura de la carga – vacía	4.968 mm	16 pies 4 pulg
10	Altura de la pared lateral trasera	906 mm	3 pies 0 pulg
11	Profundidad interior de la caja - máxima	2.132 mm	7 pies 0 pulg

12	Altura total – caja elevada	11.207 mm	36 pies 10 pulg
13	Ancho en orden de trabajo	6.640 mm	21 pies 10 pulg
14	Ancho del neumático delantero de la línea de centro	4.850 mm	15 pies 11 pulg
15	Espacio libre del protector del motor	1.057 mm	3 pies 6 pulg
16	Ancho total del techo	6.200 mm	20 pies 5 pulg
17	Ancho exterior de la caja	5.890 mm	19 pies 4 pulg
18	Ancho interior de la caja	5.510 mm	18 pies 1 pulg
19	Altura del techo delantero	5.769 mm	19 pies 0 pulg
20	Espacio libre del eje trasero	1.080 mm	7 pies 3 pulg
21	Ancho del neumático doble trasero de la línea de centro	4.285 mm	14 pies 1 pulg
22	Ancho total del neumático	6.274 mm	20 pies 8 pulg

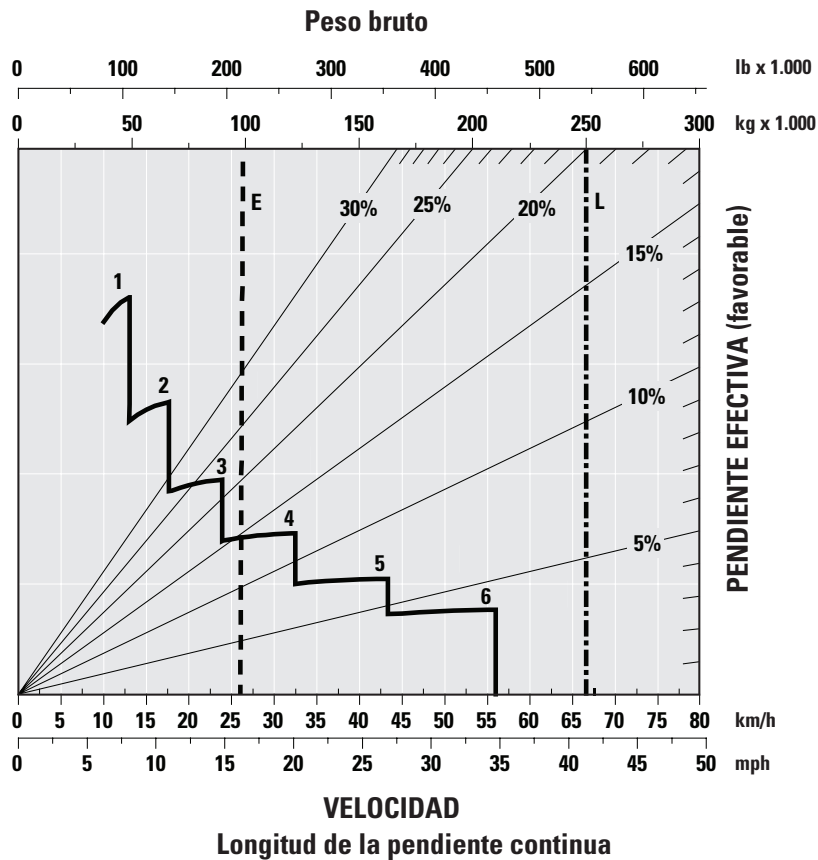
Especificaciones del Camión Minero 785C

Rendimiento del retardo

Para determinar el rendimiento del retardo: Agregue las longitudes de todos los segmentos en pendientes descendientes y, utilizando este total, consulte la tabla de retardo correspondiente. Lea desde el peso bruto hacia abajo hasta el porcentaje de la pendiente efectiva. La pendiente efectiva es igual al porcentaje real de la pendiente menos el 1% por cada 10 kg/t (20 lb/toneladas) de resistencia a la rodadura. A partir de este punto de la pendiente efectiva de peso, lea horizontalmente hasta la curva con la marcha más elevada que se pueda obtener, luego hacia abajo hasta el descenso máximo que los frenos de velocidad pueden manejar correctamente sin exceder la capacidad de enfriamiento. Las tablas siguientes se basan en estas condiciones: Temperatura ambiente de 32° C (90° F), al nivel del mar, con neumáticos 33.00-R51.

NOTA: Seleccione la marcha adecuada para mantener la rpm del motor al máximo nivel posible, sin provocar exceso de velocidad al motor. Si se recalienta el aceite de enfriamiento, reduzca la velocidad de desplazamiento para permitir que la transmisión cambie a la siguiente gama de velocidades más baja.

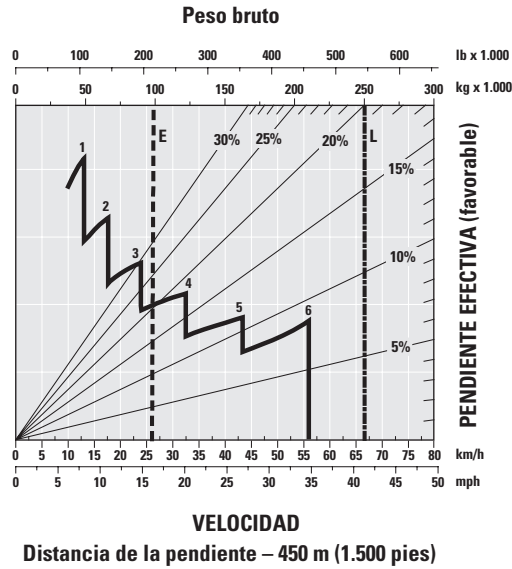
- Peso vacío en campo típico
- - - - - Peso bruto de la máquina en orden de trabajo
249.500 kg (550.000 lb)



- E - Vacío
- L - Cargado

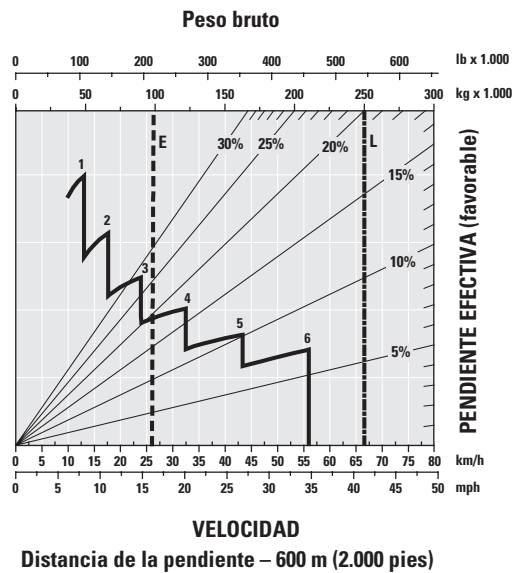
Rendimiento del retardo

- Peso vacío en campo típico
- Peso bruto de la máquina en orden de trabajo
249.500 kg (550.000 lb)



- E – Vacío
- L – Cargado

- Peso vacío en campo típico
- Peso bruto de la máquina en orden de trabajo
249.500 kg (550.000 lb)

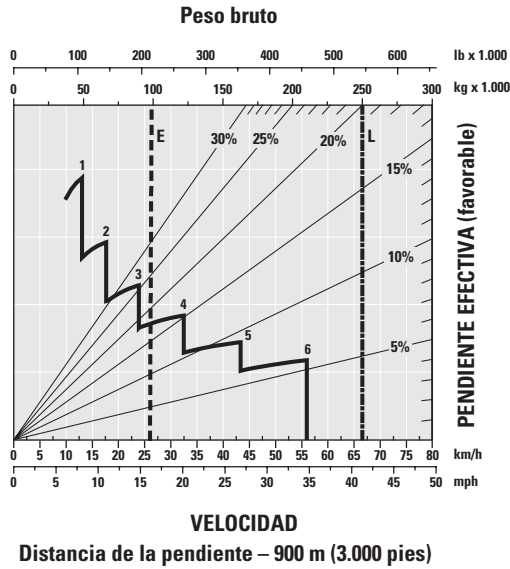


- E – Vacío
- L – Cargado

Especificaciones del Camión Minero 785C

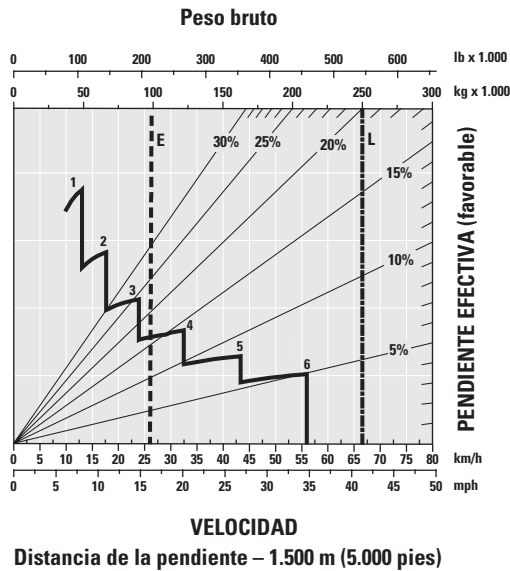
Rendimiento del retardo

- Peso vacío en campo típico
- - - - - Peso bruto de la máquina en orden de trabajo
249.500 kg (550.000 lb)



- E – Vacío
- L – Cargado

- Peso vacío en campo típico
- - - - - Peso bruto de la máquina en orden de trabajo
249.500 kg (550.000 lb)

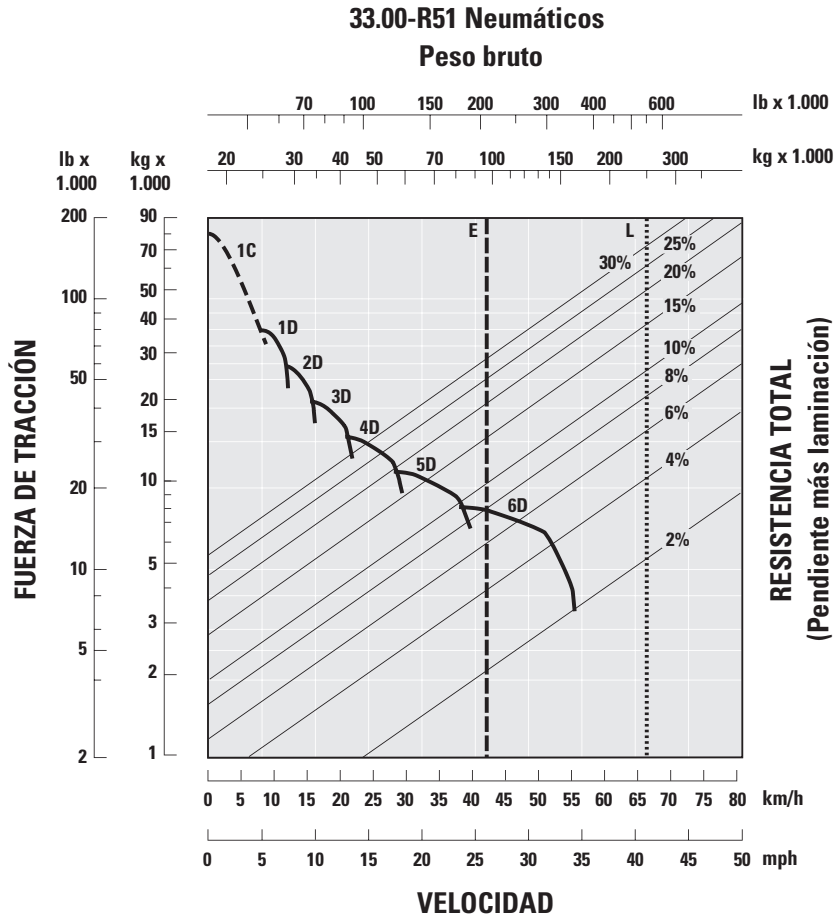


- E – Vacío
- L – Cargado

Rendimiento en subida de pendientes/velocidad/fuerza de tracción

Para determinar el rendimiento en subida de pendientes: Lea desde el peso bruto hacia abajo hasta el porcentaje de la resistencia total. La resistencia total es igual al porcentaje real de la pendiente más el 1% por cada 10 kg/t (20 lb/toneladas) de resistencia a la rodadura. A partir de este punto de la resistencia del peso, lea horizontalmente hasta la curva con la marcha más elevada que se pueda obtener, luego hacia abajo hasta la velocidad máxima. La fuerza de tracción utilizable dependerá de la tracción disponible y del peso en las ruedas de propulsión.

----- Peso vacío en campo típico
 136.080 kg (300.000 lb)



----- Mando del convertidor de par
 _____ Mando directo

E - Vacío
 L - Cargado

Especificaciones del Camión Minero 785C

Cálculo del peso/de la carga útil*

(Ejemplo)

	Piso plano		Piso de doble declive	
	kg	lb	kg	lb
Peso del chasis vacío	55.421	122.180	55.421	122.180
Tanque de combustible y combustible 1.892 L (500 gal EE.UU.)	2.232	4.920	2.232	4.920
Neumáticos (33.00-R51)	10.492	23.130	10.492	23.130
Aro 610 mm (24 pulg)	6.323	13.940	6.323	13.940
Peso del chasis	<u>74.468</u>	<u>164.170</u>	<u>74.468</u>	<u>164.170</u>
Asignación de la suciedad (4% del chasis)	2.979	6.567	2.979	6.567
Peso de la caja	25.687	56.630	21.258	46.865
Peso de los accesorios de la caja	1.996	4.400	0	0
Peso de los accesorios adicionales	+	+	+	+
Peso en orden de trabajo vacío total	<u>105.129</u>	<u>231.767</u>	<u>98.704</u>	<u>217.602</u>
Carga útil ideal	<u>144.351</u>	<u>318.233</u>	<u>150.776</u>	<u>332.398</u>
Peso bruto de la máquina en orden de trabajo	249.480	550.000	249.480	550.000

* **NOTA:** Consulte la política sobre carga útil 10/10/20 de Caterpillar para calcular el peso bruto de la máquina máximo admisible.

ANEXO B: Especificaciones técnicas de chancadores y molinos en operación

TABLE 3.1a Industrial Crushing and Grinding Data for Three Copper Concentrators, 2010. Flotation Details are Given in Table 4.1

Concentrator	Candalaria, Chile	El Soldado, Chile	Los Bronces Chile
Ore treated per year, tonnes	25,000,000 (2001)	7,700,000 (2010)	21,000,000 (2010)
Ore grade, %Cu	0.9–1.0	0.63	1.055
Crushing		Chalcopyrite	Chalcopyrite
Primary gyratory crusher	One	One	One
Diameter × height, m	1.52 × 2.26	1.1 × 1.65	1.4 × 1.9
Power rating, kW	522	300	430
Rotation speed, RPM			6.5
Product size, m	0.1–0.13	0.2	0.2
Energy consumption, kWh per tonne of ore	0.3 (estimate)	0.2	0.25 (0.18 m diameter product)
Secondary crushers	No	Yes, 4	No
First stage grinding			
Mill type	Semi-autogenous	Semi-autogenous	Semi-autogenous
Number of mills	2	1	2
Diameter × length, m	11 × 4.6	10.4 × 5.2	8.5 × 4.3
Power rating each mill, kWh	12,000	11,300	5590
Rotation speed, RPM	9.4–9.8	10.2	11.3
Vol.-% 'steel' in mill	12–15	15	13–15%
Ball size, initial	12.5 cm	12.7	12.7
Ball consumption, kg per tonne of ore	0.3	0.32	0.35
Feed	70% ore, 30% H ₂ O	80% ore 20% water	70% ore 30% water
Product size	80% < 140 μm	200 μm	3 cm
Oversize treatment	22% ore recycle through two 525 kW crushers		Oversize to pebble crushers

(Continued)

TABLE 3.1a Industrial Crushing and Grinding Data for Three Copper Concentrators, 2010. Flotation Details are Given in Table 4.1—cont'd

Concentrator	Candalaria, Chile	El Soldado, Chile	Los Bronces Chile
Energy consumption, kWh per tonne of ore	7.82		6.5
Second stage grinding			
Mill type	Ball mills	Rod + ball mills	Ball mills
Number of mills	4	4 rod, 7 ball	3
Diameter × length, m	6 × 9	3.6 × 2.5	7 × 11
Power rating each mill, kW	5600	Rod 350 Ball 550	10,800
Rotation speed, RPM		28	12
Vol.-% 'steel' in mill		47	35
Feed		70% ore, 30% w	65% ore, 35% water
Product size			80% < 212 μm
Energy consumption, kWh per tonne of ore	7 (estimate)	~8	7.2
Hydrocyclones	14 Krebs (0.5 m diameter)	14 (~0.6 m diameter)	3 (Krebs + Cavex) (0.66 m diameter)
Particle size monitor		Yes PS1200	Yes PS1200

TABLE 3.1b Industrial Crushing and Grinding Data for Three Copper Concentrators, 2010. Flotation Details are Given in Table 4.1

Concentrator	Africa, open pit	Africa, u-ground	Mantos Blancos, Chile
Ore treated per year, tonnes	4,000,000	900,000	4,500,000
Ore grade, %Cu	0.15	0.45	1.13
Crushing	Chalcocite, chalcopyrite	Chalcopyrite	Chalcocite

TABLE 3.1b Industrial Crushing and Grinding Data for Three Copper Concentrators, 2010. Flotation Details are Given in Table 4.1—cont'd

Concentrator	Africa, open pit	Africa, u-ground	Mantos Blancos, Chile
Primary gyratory crusher	1 jaw crusher	1 jaw crusher	One
Diameter × height, m	4.2 × 6.5	8.5 × 11	1.1 × 1.65
Power rating, kW	250	132	300
Rotation speed, RPM			
Product size, m	80% < 0.25	80% < 0.25	0.15
Energy consumption, kWh per tonne of ore	5.4	4.5	0.4
Secondary crushers	None	Yes, jaw crusher	Yes, 4
First stage grinding			
Mill type	semi-autogenous	semi-autogenous	ball mills
Number of mills	1	1	2
Diameter × length, m	8.53 × 4.35	6.1 × 2.75	3.8 × 4.6
Power rating each mill, kWh	6000	1300	1120
Rotation speed, RPM	14	12	21.6
Vol.-% 'steel' in mill	22%	25%	38–40
Ball size, initial, cm	12.5	12.5	
Ball consumption, kg per tonne of ore	0.41	0.9	
Feed	85% ore, 15% water	85% ore, 15% water	84% ore, 16% water
Product size	80% < 800 μm	80% < 600 μm	75% < 212 μm
Oversize treatment	Pebble crushers, SAG	Recycle to SAG	
Energy consumption, kWh per tonne of ore	8.5	6.5	13.5
Second stage grinding			
Mill type	Ball mill	Ball mill	Ball mill
Number of mills	1	1	1
Diameter × length, m	6.1 × 9.05	4.27 × 7.01	3.5 × 5.2

(Continued)

TABLE 3.1b Industrial Crushing and Grinding Data for Three Copper Concentrators, 2010. Flotation Details are Given in Table 4.1—cont'd

Concentrator	Africa, open pit	Africa, u-ground	Mantos Blancos, Chile
Power rating each mill, kW	6000	1860	940
Rotation speed, RPM	18	16	23
Vol.-% 'steel' in mill	35%	32	38–40
Feed	85% ore, 15% water	85% ore, 15% water	85% ore, 15% water
Product size	80% < 125 μm	80% < 100 μm	75% < 212 μm
Energy consumption, kWh per tonne of ore	16.8	15	20
Hydrocyclones	8 (1.1 m dia)	8 (0.25 m dia)	5 (0.5 m diameter)
Particle size monitor	Outotec PSI	Outotec PSI	

ANEXO C: Gráficos utilizados para obtener fuerza de tracción y velocidad en ejemplos de gestión de carga útil de camiones

