



Reporte

Energía en Minería

Procesos y Servicios Complementarios

Proyecto Eficiencia Energética en Minería

Marzo 2021



Por encargo de:



Ministerio Federal
de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza
y Seguridad Nuclear



Agencia de
Sostenibilidad
Energética



de la República Federal de Alemania

Edición:

Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Friedrich-Ebert-Allee 40
53113 Bonn • Alemania

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5
65760 Eschborn • Alemania

Nombre del proyecto:

Eficiencia Energética en Minería en Chile

Marchant Pereira 150
7500654 Providencia
Santiago • Chile
T +56 22 30 68 600
I www.giz.de

Responsable:

Rainer Schröder / Rodrigo Vásquez / Javier Hueichapán

En coordinación:

Ministerio de Energía de Chile
Alameda 1449, Pisos 13 y 14, Edificio Santiago Downtown II
Santiago de Chile
T +56 22 367 3000
I www.minenergia.cl

Título:**Reporte Energía en Minería****Autor:**

AIGUASOL

Alfredo González
Daniel González
Yanara Tranamil
Catalina Bravo
Camilo Acuña
Javier Cabezas

**Aclaración:**

Esta publicación ha sido preparada por encargo del proyecto "Eficiencia Energética en Minería en Chile" implementado por el Ministerio de Energía y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH en el marco de la cooperación intergubernamental entre Chile y Alemania. El proyecto se financia a través de la Iniciativa internacional sobre el clima (IKI) del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania - BMU. Sin perjuicio de ello, las conclusiones y opiniones de los autores no necesariamente reflejan la posición del Gobierno de Chile o de GIZ. Además, cualquier referencia a una empresa, producto, marca, fabricante u otro similar en ningún caso constituye una recomendación por parte del Gobierno de Chile o de GIZ.

Santiago de Chile, 2021

Contenido

1	INTRODUCCIÓN	5
1.1	PROYECTO EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA MINERÍA.....	6
2	CONTEXTO Y ANTECEDENTES	6
2.1	ESTRUCTURA DEL PROYECTO	7
3	ENERGÍA EN MINERÍA	8
4	ESTADÍSTICAS DE CONSUMO DE ENERGÍA EN MINERÍA	8
5	PROCESOS MINEROS	11
5.1	SUMINISTRO Y BOMBEO DE AGUA	11
5.1.1	<i>Descripción</i>	11
5.1.2	<i>Medidas de Eficiencia Energética</i>	12
5.1.3	<i>Proyectos Implementados</i>	15
5.2	DESALINIZACIÓN DE AGUA.....	17
5.2.1	<i>Descripción</i>	17
5.2.2	<i>Caracterización Energética</i>	18
5.2.3	<i>Medidas de Eficiencia Energética</i>	19
5.2.4	<i>Proyectos Implementados</i>	21
5.3	TRANSPORTE DE RELAVES Y PULPAS	22
5.3.1	<i>Descripción</i>	22
5.3.2	<i>Caracterización Energética</i>	24
5.3.3	<i>Medidas de Eficiencia Energética</i>	24
5.3.4	<i>Proyectos Implementados</i>	28
5.4	CORREAS Y TRANSPORTE ENTRE PROCESOS.....	28
5.4.1	<i>Descripción</i>	28
5.4.2	<i>Medidas de Eficiencia Energética</i>	33
5.4.3	<i>Proyectos Implementados</i>	37
5.5	ILUMINACIÓN.....	39
5.5.1	<i>Descripción</i>	39
5.5.2	<i>Medidas de Eficiencia Energética</i>	40
5.5.3	<i>Proyectos Implementados</i>	44
5.6	VENTILACIÓN, CLIMATIZACIÓN Y AIRE COMPRIMIDO	45
5.6.1	<i>Descripción</i>	45

5.6.2	<i>Medidas de Eficiencia Energética</i>	49
5.6.3	<i>Proyectos Implementados</i>	66
5.7	GESTIÓN DE ENERGÍA	67
5.7.1	<i>Descripción</i>	67
5.7.2	<i>Medidas de Eficiencia Energética</i>	69
5.7.3	<i>Proyectos Implementados</i>	72
5.8	TRANSPORTE DE PERSONAS	73
5.8.1	<i>Descripción</i>	73
5.8.2	<i>Medidas de Eficiencia Energética</i>	74
5.8.3	<i>Proyectos Implementados</i>	75
5.9	CAMPAMENTOS MINEROS.....	76
5.9.1	<i>Descripción</i>	76
5.9.2	<i>Caracterización Energética</i>	77
5.9.3	<i>Medidas de Eficiencia Energética</i>	78
5.9.4	<i>Proyectos Implementados</i>	81
6	BIBLIOGRAFÍA.....	82

1 Introducción

En este documento se encuentra el contenido técnico de la plataforma Web “Energía en Minería”. Esta plataforma de la Agencia de Sostenibilidad Energética el cual ha sido generado e implementado por GIZ con el apoyo del Ministerio de Energía, en el marco del proyecto “Eficiencia Energética en Minería, materias primas y clima”.

Incluye la explicación de los distintos Procesos Mineros, Medidas de Eficiencia Energética que se pueden implementar en cada uno de ellos y Proyectos Implementados, todo en el ámbito de la eficiencia energética y eficiencia operacional en minería.

El sitio web interactivo se encuentra en el siguiente enlace: www.energiaenmineria.cl.

En el sitio se encuentra el siguiente mapa interactivo de proceso mineros, que incluye información específica de cada uno de ellos, de sus medidas de eficiencia energética asociadas y ejemplo de proyectos implementados.

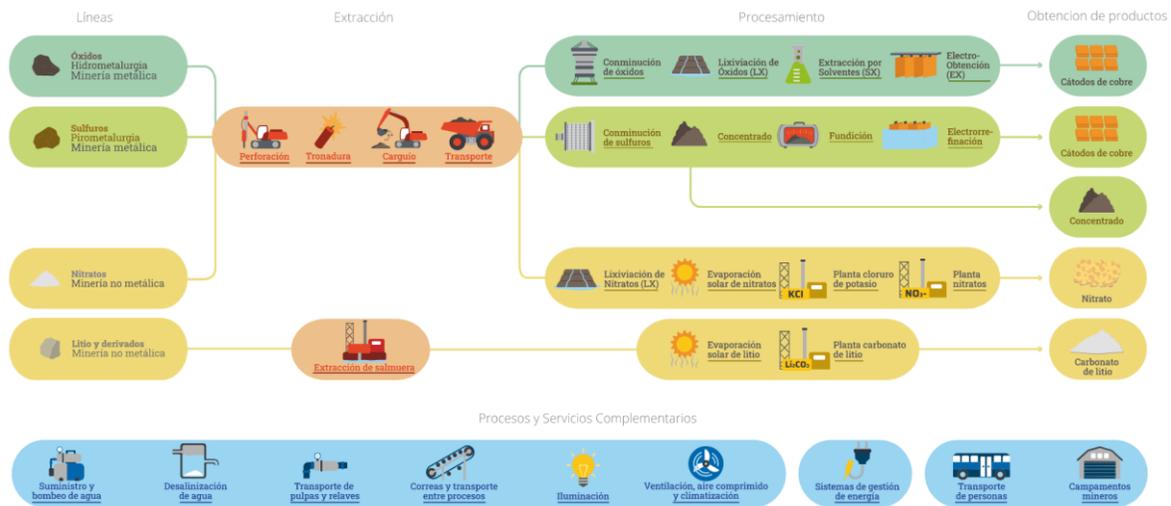


Ilustración 1. Mapa de procesos mineros. Fuente: GIZ.

El contenido técnico abarca los principales procesos consumidores de energía dentro de la Minería Metálica (Óxidos y Sulfuros) y No Metálica (Nitratos, Litio y derivados), pasando además por Procesos y Servicios Complementarios de la Minería. Estos últimos son transversales a distintos procesos, tales como: suministro de agua, desalinización, iluminación, transporte entre procesos, ventilación, etc. Se abarca además el ámbito de los Sistemas de Gestión de la Energía (SGE) y los servicios específicos a los trabajadores de la minería, tales como transporte de personas y campamentos mineros.

Por cada línea de tipo de mineral (Minería Metálica y Minería No Metálica) se explican los distintos **Procesos Mineros** y sus equipos principales que se encuentran dentro de cada uno de ellos. Todo esto desde el punto de vista del consumo de energía (eléctrica o térmica). Cada Proceso además de su descripción, incluye **Medidas de Eficiencia Energética** asociadas que es posible de implementar en cada uno de ellos. Finalmente, se presentan **Proyectos Implementados** que se han ejecutado con el fin de reducir consumos de energía o hacer más eficiente su uso, dentro en cada proceso.

El contenido técnico que aparece en este documento puede ser seleccionado por el usuario de la plataforma web, debido a que el sitio cuenta con la funcionalidad de elegir lo que se desea imprimir. Adicionalmente, se tiene la opción de imprimir el contenido completo del sitio web.

El contenido del sitio web podrá ser actualizado con nuevas Medidas de Eficiencia Energética y Proyectos Implementados, por lo cual se invita a visitarlo periódicamente. Asimismo, se invita a las empresas mineras a enviarnos sus proyectos implementados en este enlace: <https://www.ener-giaenmineria.cl/contacto/>

1.1 Proyecto Eficiencia Energética en la Minería

La GIZ, en conjunto con la Agencia de Sostenibilidad Energética (Agencia SE) y el Ministerio de Energía, buscan motivar a las empresas mineras en el país para la implementación de proyectos y medidas de eficiencia energética. En el curso del proyecto, se busca que las empresas mejoren su balance energético y climático.

Este proyecto tiene como objetivo la implementación de medidas para el aumento de la eficiencia en el uso de recursos y la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero en el sector minero. Se incluye la asesoría técnica a empresas, el desarrollo de eventos y capacitaciones, la generación de material de difusión (como el presente sitio web y guía impresa) y la implementación de una Red de Eficiencia Energética y Emisiones, basada en la metodología y conceptos de las Redes de Aprendizaje.

2 Contexto y antecedentes

En Chile, el sector minero es uno de los mayores responsables de la emisión de CO₂. Alrededor del 30% de la electricidad chilena se usa para la extraer y procesar materias primas, principalmente el cobre. Para la generación de la electricidad necesaria para este propósito, se recurre mayoritariamente a combustibles fósiles: en Chile el 40% de la energía eléctrica se genera solo a partir del carbón. A esto se suma que además de la energía eléctrica, se requieren grandes cantidades de energía térmica para el tratamiento de los metales subsidiados (cobre, molibdeno, plata, oro, litio, etc.). Por consiguiente, se calcula que en Chile el sector minero, es responsable de más de 14 millones de tCO₂ anuales. En los últimos años, la demanda energética del sector minero ha aumentado anualmente un promedio de 4%. A pesar de que los procesos de producción tienen un notable potencial de ahorro y de que Chile depende casi completamente de las importaciones de petróleo, gas natural y carbón, los planes concretos para la implementación de medidas de eficiencia energética han jugado un rol minoritario.

En la actual agenda de energía (2018- 2022) se encontraba prevista la adopción de una nueva Ley de Eficiencia Energética, promulgada en febrero de 2021. Esta ley pretende aplicar medidas de ahorro energético a los mayores consumidores de energía del país, incluyendo al sector minero. Este desarrollo adquiere un empuje adicional a través de Plan de Acción Nacional de Cambio Climático (PANCC 2017-22), la discusión sobre las metas ambiciosas metas nacionales en materia de protección climática (NDC) y la Conferencia Mundial del Clima COP25 ejecutada en 2019 en España siendo Chile el país anfitrión.

Para la economía chilena, la industria del cobre es el mayor motor de crecimiento. El posicionamiento de la minería en la economía política puede demostrarse en los siguientes datos: más del 9% del total de empleos, aprox. el 13% del PIB total y más del 50% de las exportaciones dependen de este sector.

Proyecto financiado por: Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania (BMU).

Gestionado por: GIZ Chile

Contrapartes: Ministerio de Energía de Chile, Agencia de Sostenibilidad Energética.

Duración: Abril 2019 – Marzo 2022

2.1 Estructura del proyecto

Por encargo del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania (BMU), la Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional (GIZ) apoya al Gobierno de Chile en el marco de la Iniciativa Climática Internacional (IKI), en la integración activa del sector de materias primas a la estrategia nacional de protección del clima y en la restricción de los daños y la contaminación ambiental asociada a la extracción de estas materias. Se trata de un proyecto transnacional que, además, de las medidas en Chile, incluye actividades en el sector minero de Colombia. En Chile, el aspecto de la eficiencia energética está en primer plano. Los principales hallazgos buscan aportar al debate regional y global sobre medidas de eficiencia energética en la minería.

3 Energía en Minería

El sector Minero consume energía en forma de Combustibles como de Electricidad en proporciones relativamente equivalentes. Este consumo muestra un incremento sostenido entre el año 2010 y 2018 de un 4,5% anual tanto para el consumo de combustibles como de electricidad.

El consumo principal de combustibles ocurre en el proceso de Mina Rajo (sobre 65.000 TJ al año) y el principal consumo de electricidad se observa es el área de Concentrado (sobre 50.000 TJ anuales), seguida posteriormente por los tres principales procesos de hidrometalurgia (LX/SX/EX) con 20.000 TJ y de Servicios con un poco menos de 10.000 TJ.

4 Estadísticas de Consumo de Energía en Minería

De acuerdo con el Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 2000-2019 elaborado en 2020 por Cochilco es posible comprender como se distribuye y cómo ha evolucionado el consumo de energía en el sector de la minería.

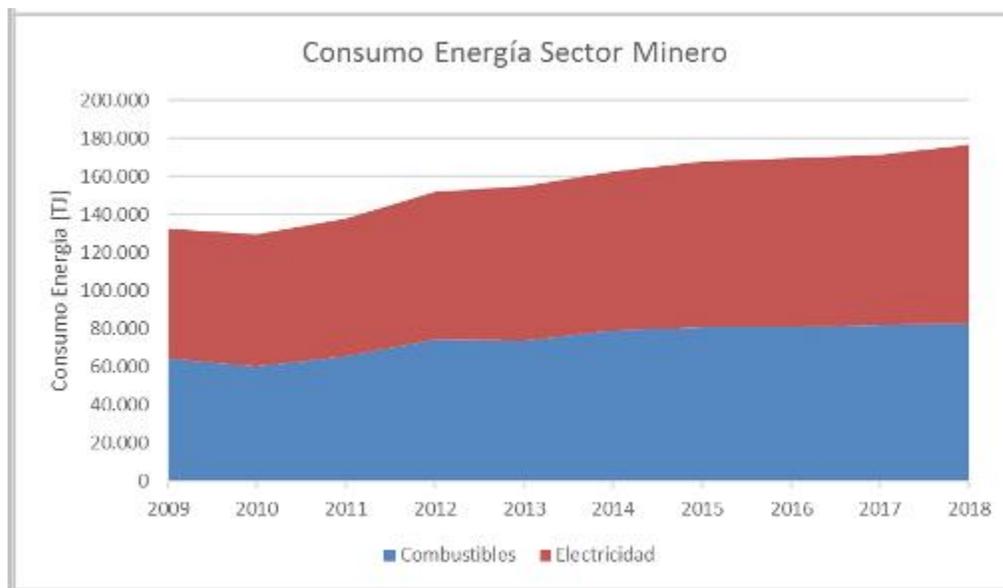


Ilustración 2. Consumo de energía en sector minería en Chile. Fuente: Cochilco, 2020.

El sector Minero consume energía tanto en forma de Combustibles como de Electricidad en proporciones relativamente equivalentes. La evolución de este consumo muestra un incremento sostenido entre el año 2010 y 2018 de un 4,5% anual tanto para el consumo de combustibles como de electricidad.

Este consumo se observa desagregado por área de proceso en la siguiente gráfica en donde se aprecia que el consumo principal de combustibles ocurre en el proceso de Mina Rajo y se explica por el combustible utilizado por los camiones para el transporte principalmente del mineral. Los restantes consumos de combustibles en otras áreas de proceso son considerablemente menores llegando a una décima parte en la fundición que corresponde a la segunda área con mayor consumo energético en forma de combustibles. Al observar los consumos de electricidad, por otra parte, se observa que

el principal consumidor de este tipo de energético en el país es el área de concentrado que alcanza un valor sobre los 50.000 TJ anuales, seguida posteriormente por los tres principales procesos de hidrometalurgia (LX/SX/EX) con 20.000 TJ y de Servicios con un poco menos de 10.000 TJ.

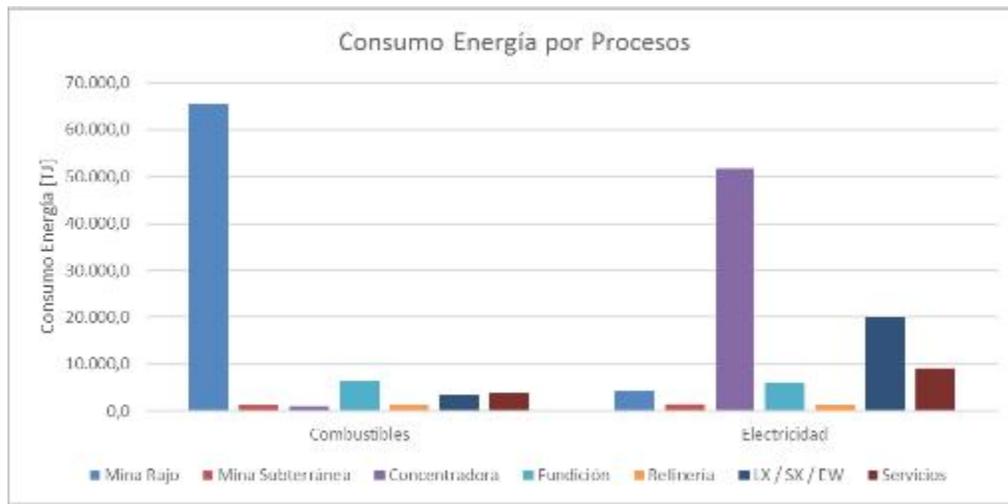


Ilustración 3. Consumo de energía por procesos en minería en Chile. Fuente: Cochilco, 2020.

Finalmente, podemos observar la intensidad energética, es decir el consumo de energía por tonelada de mineral fino contenido en cada área de proceso.

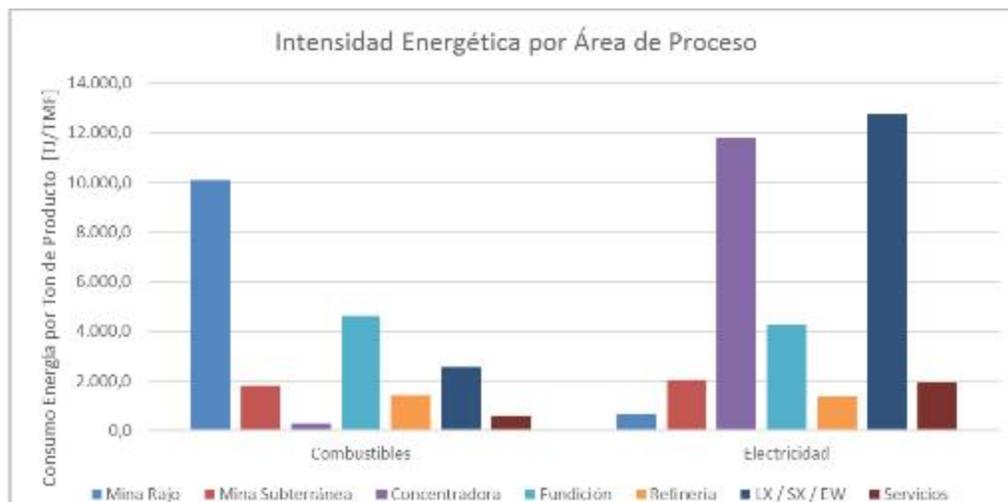


Ilustración 4. Consumo de energía en por tipo de combustibles y procesos en minería en Chile. Fuente: Cochilco, 2020.

Este gráfico permite observar la relevancia del consumo de energía de otros procesos que no se observaban en el gráfico anterior, ya que esta vez el consumo se referencia a una tonelada de mineral fino procesado por cada área y no al total de consumo del país que puede verse influenciado por una mayor concentración de plantas de un tipo frente a otras. En este sentido, en términos de consumo de combustibles el área principal de consumo sigue siendo la Mina Rajo, pero le sigue en importancia el área de fundición y los procesos de hidrometalurgia. Por otra parte, en relación con el consumo de electricidad, se aprecia que los procesos ligados a la hidrometalurgia poseen la mayor intensidad de consumo eléctrico, incluso por sobre el área de concentrados que poseía los consumos eléctricos más relevantes a nivel nacional.

Finalmente, se presenta este mismo gráfico, pero sumando los componentes de combustibles y electricidad. De este modo, se puede observar la intensidad total de energía por área de proceso. Los procesos de hidrometalurgia pasan a ser el área de proceso de mayor consumo de energía por tonelada de mineral fino producido, seguido por la concentradora, mina rajo, fundición y más abajo mina subterránea, refinera y servicios.

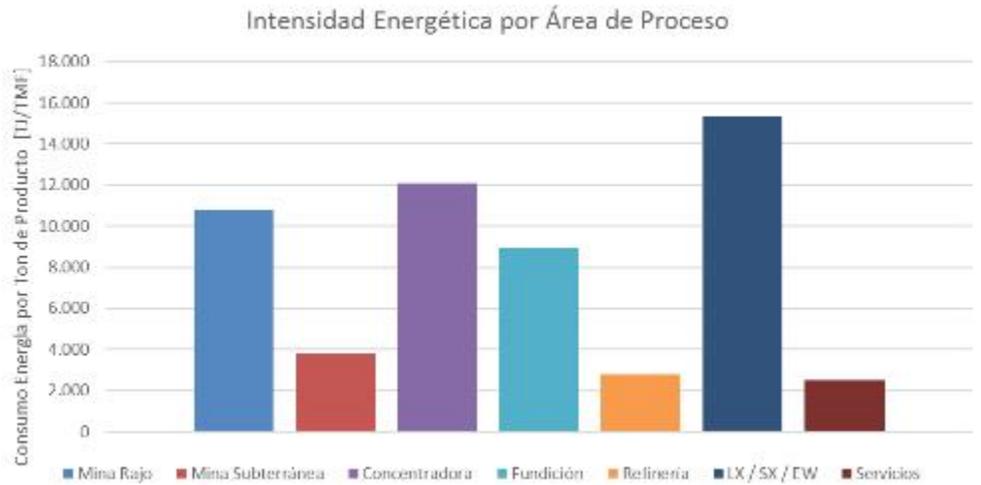


Ilustración 5. Intensidad energética por procesos en minería en Chile. Fuente: Cochilco, 2020.

5 Procesos mineros

5.1 Suministro y Bombeo de Agua

5.1.1 Descripción

El bombeo de agua está presente en diversos procesos dentro de una mina, cuyo mayor requerimiento en cuanto a demanda se asocia a la recirculación de agua. En términos generales, se estima que, del total de agua utilizada en minería, un 74,8% corresponde a agua recirculada. Cabe señalar que dicho valor fluctúa en función del sector de la minería, correspondiendo a 77,6% para la gran minería, un 58,2% para la mediana minería y 32,8% para la minería de otros metales y no metálica. El porcentaje restante de agua empleada en procesos mineros se asocia a aguas continentales y agua de mar.



Por otra parte, los sistemas de bombeo también se emplean en minas subterráneas para extraer y manejar las aguas que se generan al interior de estas. Dentro de esta área, los diferentes tipos de bombeo se pueden clasificar en desagüe principal (el agua acumulada en galerías colectoras es bombeada a la superficie) y desagüe secundario o auxiliar (el agua acumulada en galerías colectoras es enviada a las galerías colectoras principales). En cuanto a las minas a rajo abierto, los sistemas de bombeo también pueden ser necesarios en el caso de que los procesos de extracción provoquen la generación de agua subterránea.



Asimismo, se emplean sistemas de bombeo para impulsión de agua de mar para su utilización en faenas, y el bombeo de agua potable para usos sanitarios.



5.1.2 Medidas de Eficiencia Energética

5.1.2.1 Uso de Variadores de Frecuencia. M20.1

Medida operacional

Medida eléctrica

Todos los motores se alimentan de electricidad para proporcionar la velocidad requerida y ésta debe coincidir exactamente con la que exige el proceso para el cual se utiliza el motor. Una mayor o menor velocidad implicará entonces un uso eficiente o ineficiente de la energía.

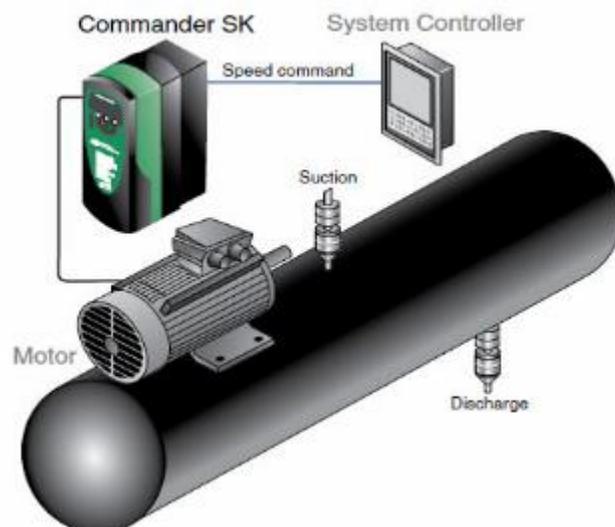
Los variadores de frecuencia permiten por ejemplo ajustar la velocidad de los motores de las bombas según los requisitos específicos de carga demandados para el bombeo de agua a puntos diferentes y con pérdidas de carga variables. Un variador de frecuencia es útil en equipos que trabajan solo un periodo de tiempo definido a su carga máxima, por ejemplo, si el sistema en cuestión solo necesita ser capaz de suministrar un flujo que corresponde al 100% unos pocos días al año, mientras que el promedio de suministro sea requerido sólo bajo el 80% del flujo nominal durante el resto del año.

El ahorro energético que se puede alcanzar con esta tecnología puede variar entre un 20% y un 70% según las condiciones de uso específico de los equipos¹, el flujo se regula modificando los valores de rpm. Al reducir la velocidad solo un 20% respecto a la velocidad nominal, el flujo también se reduce en un 20%, pues éste es directamente proporcional a las rpm. El consumo eléctrico, sin embargo, se reduce en un 50%.

Además, el uso de variadores de frecuencia para el control inteligente de los motores permite no solo incrementar la eficiencia energética de éstos, sino también supone una mejora en la productividad y a la vez alarga la vida útil de estos motores, previniendo su deterioro y evitando paradas inesperadas, proporcionando, por lo tanto, grandes ventajas económicas, operativas y medioambientales.

En resumen, las ventajas asociadas a un variador de frecuencia son:

- Evita picos de corriente en los arranques del motor.
- No incide en el factor de potencia, lo cual evita el uso de baterías de condensadores y el consumo de energía reactiva.
- Los tiempos de aceleración y desaceleración son programables.
- El consumo energético se adapta a los requerimientos del motor.
- Reduce considerablemente el ruido de los motores.
- Alarga la vida útil de las bombas.



¹ <http://new.abb.com/drives/es/eficiencia-energetica>

5.1.2.2 Limpieza de cañerías de sistema de impulsión de agua. M20.2

Medida operacional

Medida eléctrica

A lo largo de los años diferentes tipos de incrustaciones pueden obstruir la fluidez al interior de los ductos de agua, generando pérdidas de carga mayores que afectan directamente al rendimiento de las bombas utilizadas en el proceso. Este tipo de obstrucciones pueden estar presentes en zonas puntuales de las cañerías siendo necesario enviar herramientas de tipo “Pig” para realizar una limpieza interna y reestablecer el normal flujo de agua en el sistema reduciendo la carga extra generada en los sistemas de impulsión.

La carga dinámica en una tubería está compuesta por la altura de velocidad y las pérdidas de carga, las cuales pueden ser por fricción, por singularidades o por presión de trabajo de accesorios o instrumentos pertenecientes a la red de impulsión. La carga dinámica representa las pérdidas primarias (tubería recta) y secundarias (accesorios) de la tubería, por lo que la sumatoria de todas las pérdidas del fluido puede representarse en la curva cuadrática del sistema de bombeo y a diferencia de la carga estática sí depende del caudal. Para identificar las zonas de limpieza puede ser útil evaluar tramos donde existan manómetros de descarga, con esto se verificará cuánto ha sido el aumento de impulsión de la estación de bombeo por tramos debido a suciedad o fallos del revestimiento interno de la tubería.

Esta técnica de limpieza con herramientas “Pig” es recomendada por la Norma API 1160, “Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines”, para mantener la integridad de ductos y aumentar su eficiencia.

Las herramientas de limpieza se clasifican en dos grupos:

- I. **Pigs de limpieza blanda:** dispositivo desechable fabricado a partir de espuma de poliuretano (también se les conoce como pigs de espuma), son instrumentos flexibles y resistentes al desgaste, capaces de ajustarse diametralmente a reducciones y obstáculos que encuentren en su trayecto. Se utilizan principalmente para remover líquidos acumulados, arena, parafina y polvos, entre otros.
- II. **Pigs de limpieza rígida:** el cuerpo de la herramienta es fabricado en acero, acero inoxidable o aluminio. Son reutilizables y se usan para remover líquidos acumulados, arena, parafina, sedimentos, etc., por lo que para superficies abrasivas incrementa la habilidad de limpieza.

Ventajas de la limpieza:

- Mayor desprendimiento de material adherido en las paredes internas de la tubería.
- Incremento del diámetro interno efectivo del ducto.
- Menor riesgo de atascamiento o taponamiento de pigs en próximas corridas debido a grandes acumulaciones de sedimentos.
- Mejor calidad del producto transportado.

Los tipos de ductos donde pueden existir complicaciones de limpieza con este método son los que:

1. No cuentan con trampas de envío y recibo.
2. Cuentan con válvulas de puerto reducido.
3. Cuentan con uniones mayores a 10° (juntas).

4. Cuentan con conectores de derivación instalados erróneamente (Tees-Y).
5. Cuentan con cambios de diámetro mayores a 2 pulgadas.
6. Cuentan con bajas presiones y bajos flujos operacionales.



Figura: Tipos de pigs para limpieza de ductos. Fuente: Lim Pro

Mayor información en:

https://www.morkengroup.com/case_study/limpieza-de-un-oleoducto-de-26-pulgadas-con-alto-contenido-de-parafinas/

http://opac.pucv.cl/pucv_txt/Txt-0000/UCB0330_01.pdf

<http://limpronacional.com/wp-content/uploads/2016/07/Introducci%C3%B3n-a-las-Herramientas-de-Limpieza-de-Ductos.pdf>

5.1.3 Proyectos Implementados

<p>Mejoras en Sistema de Control estanque Planta de Osmosis.</p> <p>MINERA EL ABRA</p>	<p>Medida:</p> <p>Se detectó que el nivel del estanque TK625 que es donde se deposita el producto final de la planta de osmosis, en algunos periodos permanecía al 100% de su capacidad y la planta Osmosis continuaba operando. Cuando se está en esta condición el excedente de agua del TK625 cae por rebalse de vuelta al reservorio de agua no tratada, lo que se considera producción perdida. Se implementó el enclavamiento entre el nivel alto del estanque y la planta, de modo de detenerla cuando su funcionamiento no es necesario. Mediante el análisis de los datos de nivel del estanque antes y después de la implementación de la medida, se determinó que se podía ahorrar hasta 32 horas de funcionamiento de la planta de osmosis a la semana,</p>	<p>Reporte avance del convenio de cooperación entre ministerio de energía y consejo minero. Sociedad Contractual Minera El Abra</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte-EE-Freeport-El-Abra2019.pdf</p>
---	--	--

	<p>con un beneficio estimado en 166 MW/año de energía eléctrica.</p> <p>Ahorro: 166.000 KWh/año</p>	
<p>Limpieza de Cañería Sistema de Impulsión de Agua. TECK RESOURCES CHILE</p>	<p>Medida: El sistema de impulsión de agua fresca sufre desgastes debido a las incrustaciones dentro de la cañería, con lo cual el flujo se restringe y para la misma unidad de volumen de agua el gasto es mayor. Por lo que como medida de eficiencia se realiza un proyecto de limpieza interna de la tubería, con el objetivo de llevarla a su condición 0 de operación y así tener mayor disponibilidad de agua con menor cantidad de energía (se estima un 5% de mejoras en uso de energía).</p> <p>Ahorro: Reducción energía: 10,9 [TJ]/año Reducción emisiones gases: 1.271 [tCO2-eq/año]</p>	<p>Reporte avance del Convenio de Cooperación entre Ministerio de Energía Y Consejo Minero TECK RESOURCES CHILE. 2020</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_Teck2019.pdf</p>
<p>Reutilización de agua de descarte Mina Sierra Gorda KGHM</p>	<p>La mina Sierra Gorda utiliza el agua de mar de descarte del proceso de enfriamiento de la termoeléctrica ubicada en la bahía. La planta termoeléctrica en lugar de usar el recurso hídrico y devolverlo al mar, permite que la mina Sierra Gorda capture esta agua y la eleve hasta los 1.700 m sobre el nivel del mar, donde está la faena, viajando del orden de 140 km a través de un acueducto.</p> <p>Esta innovación permite proyectar una actividad minera que reduce externalidades medio ambientales relevantes, y potencia las medidas de mitigación ambiental existentes en los proyectos involucrados; estableciendo un escenario de costos competitivos para la producción, al eliminarse la desalación como etapa del proceso.</p> <p>El agua descartada no sólo es usada para sus procesos productivos de beneficio de mineral, sino que también es usada para sus sistemas de emergencia, como red de incendios, y para la aplicación de medidas medio ambientales, tales como humectación de superficie de botadero de caminos Mina entre otros, lo que aporta a reducir las potenciales emisiones de material particulado de la faena.</p>	<p>Fuente: Consejo Minero</p> <p>https://consejominero.cl/plataforma-social/cuidado-del-medio-ambiente/reutilizacion-de-agua-de-mar-descartada-desde-procesos-de-enfriamiento-en-termoelectrica/</p> <p>https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjgZgsxd3tAhUalbkGHZCgDbAQFjAEeg-QIC-BAC&url=https%3A%2F%2Fwww.sgscm.cl%2Fuploads%2FReporte%2FVB%20Interior%20Reporte%20Sostenibilidad%20SG%202018%2019%2520julio.pdf&usq=AO-vVaw3lco63JJDokrEM_7tWQ2my</p>
<p>Cambio de línea de impulsión Desaladora actual Minera Escondida BHP</p>	<p>Medida: Se detecta que el bombeo de agua desalinizada de Planta 0 por acueducto de 42" tiene un menor consumo específico de energía por metro cúbico que el acueducto utilizado actualmente de 24". Se plantea utilizar acueducto de 42" EWS como línea de impulsión de agua desalinizada, lo que genera una reducción del consumo específico en el bombeo de agua en un 13%.</p> <p>Ahorro: 1,95 kWh/m3 Reducción de Consumo Específico</p>	<p>Fuente: Consejo Minero</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/08/Escondida-2018.pdf</p>

5.2 Desalinización de Agua

5.2.1 Descripción

En los últimos años, el consumo de agua de mar en la minería ha aumentado, esto a causa de la criticidad por la cual están atravesando los acuíferos de la zona norte del país. En gran parte de las faenas en las cuales se utiliza agua de mar, se realiza un proceso de desalinización a través del cual se extraen las sales disueltas en ella. El procedimiento asociado a esta tarea consiste en extraer agua de mar mediante succión desde el océano, impulsándose luego mediante sistemas de bombeo a la planta de tratamiento, la que puede estar situada en la faena o cerca de la costa. El tratamiento mayormente utilizado en Chile para llevar a cabo la desalinización corresponde a la técnica de ósmosis inversa, la que se caracteriza por generar un menor daño ambiental.



Como parte del proceso de desalinización mediante la técnica de ósmosis inversa, se realiza en primer lugar un pre-tratamiento del agua de mar cuyo fin es eliminar impurezas que puedan afectar el correcto funcionamiento de la planta de tratamiento. Posteriormente, al agua de mar resultante se le aplica una alta presión para así contrarrestar la presión osmótica natural, lo cual se realiza empleando bombas que desplazan el agua a través de una membrana semipermeable desde una zona con mayor concentración de sales a una de menor concentración. De esta manera se obtiene por un lado salmuera concentrada, y por otro, agua dulce con baja concentración de sales. Como proceso final, se encuentra el sometimiento del agua dulce resultante a una fase en la cual se controlan propiedades como pH y alcalinidad, niveles de calcio, temperatura, entre otros.



5.2.2 Caracterización Energética

Es de relevancia señalar que este nuevo proceso incluido en la cadena productiva tiene asociado un alto costo energético, el cual se asocia al alto consumo eléctrico requerido por los sistemas de impulsión para desplazar el agua de mar a la faena. En efecto, el consumo de energía en la desalinización de agua de mar, considerando la técnica de osmosis inversa, representa un tercio del costo total de la cadena productiva, teniendo un costo que oscila en 5 US\$/m³ de agua producida.

- Bombas de impulsión
- Sistema de osmosis inversa



5.2.3 Medidas de Eficiencia Energética

5.2.3.1 Recuperación de energía en plantas de osmosis inversa. M21.1

Medida operacional

Medida eléctrica

Las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) tendrán un rol clave en las operaciones de las plantas desalinizadoras a futuro, en vista a que existen proyectos de osmosis inversa que están asociados a plantas fotovoltaicas. También son de interés los proyectos de plantas de concentración solar y su acople a sistemas de desalinización térmica. Esto acoplado a procesos con una incorporación de agua salada o parcialmente salada pueden contribuir a reducir el gasto energético del proceso.

Otro aspecto importante es que el mayor porcentaje de consumo energético de una planta desaladora está en las bombas. Una planta normalmente hace uso de bombas de alta y baja presión para las distintas fases del proceso de desalación.

- **Las bombas de baja presión** son necesarias, por ejemplo, para la toma de agua y para su impulsión a la planta. En función de las características hidráulicas de la toma de agua (las más habituales son tomas abiertas, pozos costeros y drenes horizontales o galerías perforadas bajo lecho marino) el consumo energético de la captación de agua varía considerablemente. Normalmente son estas mismas bombas las que impulsan el agua a la planta. Dependiendo de la distancia al mar, y de la cota en la que se sitúe la planta, también estos consumos pueden variar enormemente de una planta a otra.
- **Las bombas de alta presión** son necesarias para impulsar el agua a través de las membranas. Esta presión debe ser superior a la presión osmótica de la disolución salina, lo que supone que típicamente debe llevarse el agua de mar a una presión de aproximadamente 65-70 bares.

Los sistemas de recuperación de energía han ido evolucionando a lo largo del tiempo. En un primer momento, se utilizaban bombas invertidas movidas por la presión y el caudal de la salmuera, pero pronto se introdujeron las Turbinas Pelton por su mayor rendimiento de recuperación. Sin embargo, en los últimos años las Cámaras de Intercambio de Presión, con un mejor rendimiento de recuperación aún, se han convertido en el nuevo estándar en este ámbito.

Estas Cámaras de Intercambio de Presión, que actualmente las hay en el mercado de distintos tipos, son dispositivos que transfieren directamente la alta presión de la salmuera de rechazo al agua de mar de entrada poniendo en contacto ambas corrientes.

Actualmente las posibilidades de mejora de rendimientos de los equipos y de los circuitos hidráulicos de la desalación por ósmosis inversa son muy limitados ya que prácticamente se ha llegado a los límites termodinámicos, por lo que el siguiente paso para la reducción significativa del consumo energético de una planta de ósmosis inversa está en rebajar las presiones de trabajo, es decir, desarrollar unas membranas que permitan operar a menor presión con una producción igual o superior, o emplear un tipo de membrana que pueda funcionar con pretratamientos menos exigentes a los actuales.

Más información:

<https://www.revistaei.cl/reportajes/consumo-energetico-uso-agua-mar-mineria-subira-10-al-2029/>

<https://aedyr.com/mejora-eficiencia-energetica-desalacion/>

<https://www.mch.cl/reportajes/una-solucion-con-pros-y-contras/#>



Figura: Planta desaladora. Fuente: Revista Minería Chilena

5.2.3.2 Mejoras de sistema de control de Estanque de Osmosis. M21.2

Medida operacional

Medida eléctrica

Los sistemas de control permiten monitorizar y establecer respuestas automáticas a eventos adversos a la eficiencia del tratamiento de agua. Específicamente, el control de estanques de osmosis permite mejorar la eficiencia de todo el sistema evitando problemas de:

- PH del agua.
- Nivel de fluido en el estanque.
- Temperatura.

Este tipo de problemas pueden ser controlados directamente por sensores instalados en el sistema de almacenamiento de agua y con esto evitar que existan retrasos por falta de fluido de alimentación.

La constante de permeación del sistema está regida por variaciones en la temperatura del fluido de igual forma que el PH, ya que la proporción de hidrólisis es acelerada por incrementos de temperatura y también en función del PH alimentado. Valores débilmente ácidos (entre 5 y 6) aseguran la

más baja proporción de hidrólisis, por eso controlar estos parámetros permiten minimizar el efecto de la hidrólisis aumentando la eficiencia de la operación de osmosis.

Más información:

<https://core.ac.uk/download/pdf/187495533.pdf>

<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/4189/Capitulo2.pdf>



Figura: Planta desaladora. Fuente: Presentación “Minería Sostenible: De Amenaza a Oportunidad” de Jorge Sanhueza

http://clgchile.cl/wp-content/uploads/2020/11/Jorge_Sanhueza_Codelco.pdf

5.2.4 Proyectos Implementados

<p>Planta desaladora a gran escala con equipos eficientes</p>	<p>Con uso de tecnología de punta para la construcción de la operación de Teck Quebrada Blanca durante la nueva etapa de su proceso productivo (QB2), se construye una de las más grandes plantas desaladoras de agua de mar que permitirá a Teck abastecer de 1.000 l/s de agua de mar desalinizada.</p>	<p>Fuente: Andritz https://www.andritz.com/pumps-en/success-stories/water-and-waste-water/quebrada-blanca-ii</p>
<p>Mina Quebrada Blanca</p>	<p>Se utilizará un proceso de ósmosis inversa, que posteriormente será bombeada hasta la planta concentradora de la minera ubicada a una altitud de 4.300 m.</p> <p>La Planta Desaladora Quebrada Blanca considera 11 bombas de proceso y dos centrifugadoras. Cinco bombas de eje de línea vertical para el proceso de pretratamiento, tres de las cuales actúan como bombas de retrolavado, mientras</p>	<p>Fuente: Consejo Minero https://consejominero.cl/plataforma-social/construccion-de-la-primera-planta-desalinizadora-</p>

<p>TECK RESOURCES CHILE</p>	<p>que las otras dos bombas transportan el líquido de retrolavado desde el sistema de pre-tratamiento a las centrífugas para deshidratación. Además, se proporcionan cinco bombas axiales de carcasa partida de doble flujo de la serie ASP como bombas reforzadoras generales. Como parte del proceso principal, bombean el agua de mar filtrada a las bombas de alta presión. Una bomba centrífuga de una etapa de la serie ACP completa el suministro de las bombas. Transporta el agua de mar filtrada al denominado sistema de flotación por aire disuelto (DAF) que actúa como bomba de circulación DAF. Este es un proceso de tratamiento de agua, que aclara las aguas residuales al eliminar los sólidos en suspensión como el aceite u otra materia sólida. Todas estas máquinas hidráulicas cumplen con los requisitos en términos de eficiencia, larga vida útil, facilidad de mantenimiento y rentabilidad. El material para el equipo, para la eliminación de la salmuera, que es la sal residual, ahorra energía y es ecológicamente compatible. Para disponer de esta agua salada altamente concentrada de forma segura, se consideran dos decantadoras centrífugas.</p> <p>Como resultado de la estructura hidráulica de alta eficiencia de la unidad giratoria, el radio de descarga del líquido clarificado, el centrado, se mantiene al mínimo. Esto ayuda a recuperar la energía cinética en el líquido y reducir el consumo de energía hasta en un 15 por ciento. El disco de verterero TurboJet, que funciona según el principio de retroceso del mismo modo que los motores a reacción, recupera la energía cinética restante del líquido clarificado. Al hacerlo, reduce el consumo de energía hasta en un 30%. Con un sistema de propulsión regenerativa, la energía de frenado de la espiral interior contra el tambor exterior se recupera y se dirige de vuelta al motor principal. Este proceso reduce el consumo de energía en otro cinco por ciento. La optimización mediante los últimos métodos de simulación por ordenador garantiza el menor consumo de floculante posible, reduce significativamente el desgaste y vuelve a reducir el consumo total de energía en otro dos por ciento.</p>	<p>de-gran-escala-para-la-mineria-en-la-region-de-tarapaca/</p> <p>Fuente: Teck</p> <p>https://www.teck.com/media/Connect-vol-25-ES.pdf</p>
<p>Cambio de línea de impulsión Desaladora actual</p> <p>Minera Escondida BHP</p>	<p>Se detecta que el bombeo de agua desalinizada de Planta 0 por acueducto de 42" tiene un menor consumo específico de energía por metro cúbico que el acueducto utilizado actualmente de 24". Se plantea utilizar acueducto de 42" EWS como línea de impulsión de agua desalinizada, lo que genera una reducción del consumo específico en el bombeo de agua en un 13%.</p> <p>Ahorro:</p> <p>1,95 kWh/m3 Reducción de Consumo Específico</p>	<p>Fuente: Consejo Minero</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/08/Escondida-2018.pdf</p>

5.3 Transporte de Relaves y Pulpas

5.3.1 Descripción

El transporte de relaves y pulpas se lleva a cabo fundamentalmente mediante un sistema de tuberías reforzadas, o mineroductos, en conjunto con un subsistema de bombeo que da impulsión al material de interés. Para el transporte de material al interior de un mineroducto, previamente se prepara una mezcla sólido-líquida compuesta por el sólido granular de interés y una cantidad adecuada de agua, con el fin de permitir su almacenamiento, recuperación y manipulación. En términos generales, la finalidad es obtener un producto bombeable en función de la distancia a recorrer.



El diseño de las tuberías corresponde a uno de los parámetros de mayor importancia, en donde se debe tener en consideración las presiones de operación, las características mecánicas del material, sismicidad del área, fenómenos de desgaste, abrasión y corrosión. En cuanto al sistema de bombeo, es necesario utilizar uno acorde al material a transportar, y el que deberá dimensionarse de manera apropiada sin recurrir al sobredimensionamiento.



5.3.2 Caracterización Energética

El consumo energético del transporte de relaves y pulpas viene dado principalmente por sistemas de bombeo. Las aplicaciones de bombas de pulpa son variadas, y reciben un nombre particular en función del proceso en la cual se utiliza:

- Bombas de espuma, las cuales se emplean en el tratamiento de lodos espumosos (flotación)
- Bombas de transferencia de carbón, las que llevan a cabo el transporte hidráulico apaciguado de carbón en circuitos CIP o carbón en pulpa y CIL o carbón en lixiviación
- Bombas de pozo, las cuales operan desde los sumideros casetas de bombas sumergidas, con rodamientos y transmisión secos.
- Bombas sumergibles, las cuales por estar sumergidas en conjunto con el sistema de transmisión.

Ventajas y desventajas

Las ventajas asociadas a estos sistemas son:

- Alta eficiencia, creciente al aumentar el volumen de material de transporte, así como al incrementar la distancia
- Adaptable a cualquier topología de terreno
- Se pueden enterrar o instalar en la superficie del terreno
- Permiten un control automatizado
- Protección contra condiciones meteorológicas adversas

Con relación a las desventajas, estas son:

- Poca flexibilidad en cuanto a capacidad de transporte, ya que a velocidades reducidas existe el riesgo de sedimentación y bloqueo. Al trabajar en grandes capacidades, aumenta el costo de bombeo y el desgaste
- Limitada capacidad de distribución
- Requerimientos de agua para el transporte
- Limitaciones del producto, debido a que debe ser compatible con el fluido a utilizar, separable del mismo en destino, y compatible con el proceso ulterior del mineral.
- Altos niveles de inversión

5.3.3 Medidas de Eficiencia Energética

5.3.3.1 Diseño Adecuado del Circuito de Transporte de Pulpas y Relaves. M22.1

Medida de diseño

Medida eléctrica

Se recomienda realizar un diseño integral del circuito de transporte de pulpas y relaves basado en la selección apropiada de la ruta de tuberías de transporte, en la estimación de los requerimientos de velocidad y flujo de material requerido para la operación de la planta, en el correcto diseño de

los tanques o depósitos de almacenamiento, mantenimiento, diámetro de las tuberías y en la selección de las bombas de impulsión con la potencia y formato apropiados. Asimismo, toda la información referente al diseño y operación de la planta debe ser clara y fielmente transmitida a los operadores, para de esta forma asegurar el correcto funcionamiento de ésta.

Dentro de esta área existen estudios claves para poder ejecutar un buen diseño del circuito de transporte, éstos involucran:

- Ensayos en las Pulpas y Relaves
 - Ensayos de laboratorio
 - Ensayos de loop de cañería (muestras discretas)
 - Pruebas Piloto (Masivas)

Estos ensayos involucran información de:

- Granulometría
- Propiedades del fluido
- Ensayos de descenso
- Abrasividad
- Corrosión
- PH
- Sedimentación

Otro de los aspectos importantes en esta evaluación son los de carácter ingenieril a tener en cuenta:

- Estudios de factibilidad y diseño conceptual
- Reconocimiento y evaluación del trayecto
- Programas de pruebas de laboratorio y de Loops
- Modelamiento hidráulico complejo
- Ingeniería básica y de detalle
- Sistemas de detección de fugas
- Software de operaciones y de simulación de tuberías
- Sistemas SCADA y de telecomunicaciones para tuberías
- CQA/ CQC
- Comisionamiento y puesta en marcha
- Optimización y mantenimiento de las operaciones de tuberías
- Diseño e integración de los sistemas de control
- Capacitación a los operadores y apoyo a las operaciones

La suma de todos estos aspectos de estudio permite establecer condiciones específicas para el proceso de la ingeniería conceptual, ingeniería básica e ingeniería de detalle, generando una alta calidad de trabajo y selección de equipos adecuados maximizando la eficiencia de la operación, y por lo tanto, reduciendo los gastos energéticos de la planta. Estos ahorros energéticos se derivan principalmente de un correcto uso de equipos en sus operaciones más eficientes y evitando pérdidas o fugas en el sistema, bajos mantenimientos o problemas por corrosión o desgaste.



Figura: Tubería de relave. Fuente: Ausenco

Más información:

https://www.dosso.cl/fm_weblogin/pdf/5-ray.pdf

<https://www.ausenco.com/es/Sistemas-de-transporte-de-pulpas-por-tuber%C3%ADas>

5.3.3.2 Análisis Reológico en el Transporte de Pulpas. M22.2

Medida operacional

Medida eléctrica

El transporte óptimo de pulpas minerales y en consecuencia un menor consumo de energía en este proceso está relacionado principalmente con la estimación, a través de expresiones empíricas, de las pérdidas de carga entre dos puntos de una conducción. Existen diferentes fórmulas y metodologías para estimar y evaluar este transporte, las que requieren directa o indirectamente de la elección de parámetros reológicos, de modo de estimar adecuadamente la pérdida de carga a las condiciones del material a transportar.

Los parámetros reológicos corresponden a aquellos que permiten describir el comportamiento de las deformaciones y flujo de cualquier material. Cada pulpa tiene sus propios parámetros reológicos como viscosidad, tensión de fluencia, entre otros, que a su vez dependen de su granulometría, concentración, pH, entre otras variables.

Los parámetros reológicos de viscosidad de la pulpa, y en especial el esfuerzo de fluencia definen las características hidráulicas de las conducciones (canaletas o tuberías), la necesidad de sistemas de bombeo y las características mecánicas de éste (bombas centrífugas, de desplazamiento positivo, de pistón, etc.) y por ende, es necesario conocerlas para un correcto diseño y operación de estos sistemas. Por ejemplo:

- Si se agrega agua a la mezcla, la viscosidad disminuye en un amplio rango de velocidades de corte.
- Si se agrega betonita, la viscosidad aumenta.
- Los polímetros contribuyen a aumentar la viscosidad a altas velocidades de cizalla
- La cal blanca se utiliza para aumentar la viscosidad a velocidades de cizalla más bajas.

El punto de cedencia, por ejemplo, nos indica la fuerza mínima necesaria para iniciar el flujo de la lechada, mientras que la viscosidad es una medida de la resistencia de la suspensión al flujo. Se necesita una cantidad desproporcionada de energía para superar el punto de cedencia y hasta que se llegue al punto de cedencia la resistencia y la presión en la tubería aumentan proporcionalmente mientras el lodo está en reposo. Por ende, si el punto de cedencia es demasiado alto, es imposible iniciar el proceso de bombeo. Es vital monitorear y controlar estas propiedades reológicas porque un pequeño cambio en la eficiencia del bombeo puede tener efectos significativos en la energía y los costos.

El punto de cedencia y la viscosidad pueden ser influenciados por la variación en la composición del lodo, por ejemplo, la cantidad de agua, aditivos (sólidos, polímeros, líquidos), granulometría y temperatura de bombeo. Con frecuencia se necesita una suspensión de reducción de cizalla, lo que aumenta el esfuerzo de corte, reduce la viscosidad de la suspensión y la hace más fácil de bombear.

Debido a la gran variación que presentan las pulpas minerales en términos de tamaño de partículas, concentraciones de transporte y pH, la estimación de los parámetros reológicos es incierta. Es posible reunir información histórica o de faenas similares (benchmarking) para estimar valores de dichos parámetros, pero ellos deben ser utilizados cuidadosamente dado que las características de las pulpas producidas dependerán en buena medida del mineral extraído según el plan minero. Cambios en las características mineralógicas en el mineral (como por ejemplo un aumento en la presencia de arcillas) pueden producir cambios importantes en el comportamiento reológico de los productos.

Lo anterior refuerza la idea de mantener caracterizado periódicamente en términos reológicos el material transportado con instrumentos y metodologías confiables, lo que permitiría efectuar oportunamente cambios operacionales y disminuir los riesgos de embanques, roturas, desbordes y otras fallas operacionales asociadas al transporte y concentración de pulpas.



Figura: Bombeo de relave. Fuente: Anton Paar

Más información:

<https://wiki.anton-paar.com/es-es/principios-basicos-de-reologia/investigacion-reologica-de-la-explotacion-minera-y-petrolera/>

<https://www.mch.cl/reportajes/la-importancia-del-analisis-reologico/>

5.3.4 Proyectos Implementados

<p>Mini-central de pasada de relaves Division El Teniente CODELCO</p>	<p>Codelco adjudicó la construcción y operación de la primera minicentral de pasada del mundo que utilizará relaves como fuente de energía, en división El Teniente. Permitirá aprovechar la energía que actualmente se disipa en las cascadas de relave. Operando en régimen, debería generar alrededor de 20.000 MWh/año, equivalente al consumo eléctrico de unos 8.000 hogares. La minicentral se ubicará en la primera cascada de la conducción que lleva los relaves desde la concentradora Colón hasta el tranque Carén (a 87 kilómetros de distancia). Utilizará dos turbinas, con una potencia conjunta de 2,4 MW. Cuando la minicentral esté construida, cada turbina estará conectada a un generador, un variador de frecuencia y un transformador. La central se emplazará en torno a la primera cascada.</p>	<p>Fuente: Revista Minería Chilena https://www.mch.cl/2016/01/21/codelco-adjudico-primera-minicentral-de-pasada-del-mundo-que-utilizara-relaves/</p>
--	---	--

5.4 Correas y Transporte entre Procesos

5.4.1 Descripción

El transporte entre procesos se lleva a cabo principalmente por camiones, correas transportadoras, sistemas neumáticos, trenes, entre otros.

El proceso de transporte por camiones se ha tratado en un proceso particular de la etapa de extracción del mineral. Sin embargo, a continuación, se pretende dar una descripción de otros equipamientos y maquinarias utilizadas para el transporte entre procesos, siendo las correas transportadoras uno de los elementos de mayor relevancia y que además poseen un consumo de energía relevante dentro de la minería.



Correas o cintas transportadoras

Las correas transportadoras constituyen un método de transporte continuo y económico. Estas, se constituyen de bandas, bastidores, rodillos, soportes, reductores, frenos y mecanismos antirretorno, dispositivos de tensado y equipamiento eléctrico. Sus principales ventajas respecto al uso de camiones volquetes son:

- El coste de operación y mantenimiento es menor, ya que requiere de mano de obra menos especializada y una cantidad de operadores más reducida.
- Las cintas transportadoras poseen un mayor rendimiento de operación, del orden del 75% respecto a los volquetes, los cuales cuentan con un rendimiento que oscila en un 45%. Cabe señalar que dicha diferencia es mayor al incrementar la pendiente del perfil de transporte.
- La energía consumida en las cintas transportadoras es eléctrica en lugar de diesel.
- La capacidad de transporte es independiente de la distancia, a diferencia de los volquetes.
- La distancia a recorrer respecto a los volquetes puede ser menor, debido a la mayor capacidad de operación frente a pendientes de terreno superiores.
- Los costos asociados a la construcción y mantenimiento de las pistas es menor debido a su menor anchura, longitud e intensidad de circulación.
- El proceso de extracción se transforma en un proceso continuo respecto a la intermitencia asociada a los volquetes.
- La vida útil del sistema de cintas transportadoras es mayor.
- La sensibilidad operacional respecto a condiciones climáticas es menor.
- Emiten menor ruido y polvo respecto.
- El proceso productivo tiene la facultad de ser racionalizado y automatizado, facilitando su supervisión
- El sistema permite el transporte de pequeñas capacidades hasta grandes niveles de producción

En cuanto a sus desventajas, estas son:

- Mayor nivel de inversión
- Reducida versatilidad para modificar la producción, procurando por tanto una apropiada planificación.



Por otra parte, este mecanismo de transporte se puede clasificar en cintas fijas o estacionarias, cintas ripables o semimóviles, y cintas móviles. Con respecto a la primera, este es el grupo de uso más generalizado dentro de las explotaciones e incluso en las plantas de tratamiento, parques de homogeneización, entre otros. Las cintas ripables, por otra parte, son aquellas que permiten desplazamientos frecuentes mediante equipos auxiliares y, por último, las cintas móviles corresponden a equipos que disponen de una estructura metálica semirrígida de módulos con distintas longitudes, que van montadas sobre orugas que aportan al sistema una gran movilidad.



Apiladores

Los apiladores son parte de un proceso de operación continuo, cuyo fin es verter los materiales estériles en los puntos correspondientes y la colocación selectiva de los minerales de interés. Existen los siguientes tipos de apiladores:

- Cintas giratorias asociadas a un triper.
- Apiladores compactos.
- Apiladores semicompactos con cinta de alimentación sobre el triper.
- Apiladores semicompactos con cintas de alimentación suspendida.
- Apiladores semicompactos con cintas de alimentación sobre orugas y asociadas a un triper con cinta giratoria.
- Apiladores convencionales con cintas de alimentación sobre orugas asociadas a un triper con cinta giratoria.





Carros tolva

Los carros tolva tienen la función de alimentar las cintas ripables, ya sea desde la máquina de producción directamente, o bien desde equipos intermedios. Generalmente, se desplazan sobre vías por medio de sistemas de tracción autónoma; no obstante, cuando se trabaja con materiales pegajosos y blandos, el sistema de traslación suele realizarse mediante orugas.

Carros cinta

Un carro cinta se define como una cinta móvil que se instala sobre una plataforma giratoria. En sí, la cinta que conforma de dos partes: una más corta con una tolva que recoge el material y otra más larga que lo deposita en el punto de entrega.

Carros transportadores

Los carros transportadores, o vagones, corresponden a unidades autónomas equipadas con motor diesel, cuyo propósito es realizar funciones auxiliares dentro de las explotaciones. Los carros cuentan con una plataforma elevable y giratoria que permiten entregar el material en cuestión en el punto de depósito.

Tractores

Los tractores o “bulldozers” corresponden a maquinarias empleadas como unidades de producción en operaciones de arranque y empuje. Los modelos existentes en la actualidad se pueden clasificar en dos: tractores de ruedas y tractores de orugas, siendo estos últimos los más conocidos. Dichos equipos son muy versátiles, por lo que la gama de aplicaciones en minería es muy amplia. En primer lugar, pueden fragmentar y esponjar la roca utilizando el ripper, cuyas ventajas son: procedimiento seguro y simple, el número de operadores requeridos es mínimo y sin excesiva experiencia, no genera vibraciones y onda aérea, generalmente, cuando se puede aplicar, es un método de arranque

más barato que la perforación y tronadura. Asimismo, cuando las condiciones lo permiten, estos equipos se emplean para empujar materiales sueltos o poco consolidados. En minería, los trabajos en los cuales se emplea esta maquinaria son:

- Limpieza y desbroce de terrenos
- Extendido en botaderos
- Remodelado de terrenos y descompactado de los materiales superficiales
- Alimentación de cargadoras
- Desmante de estériles
- Alimentación a cintas



Tractor o bulldozer minero. Fuente: Revista minera

5.4.2 Medidas de Eficiencia Energética

5.4.2.1 Elección de mecanismo para descarga de material en correa transportadora. M23.1

Medida operacional

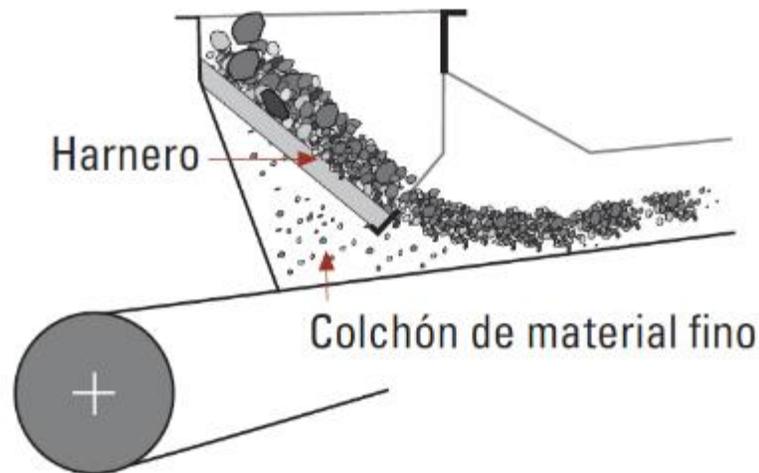
Medida eléctrica

Se sugiere seleccionar el mecanismo adecuado para depositar la carga sobre la correa transportadora para de esta forma prolongar la vida de ésta.

Para su diseño se sugiere considerar las siguientes recomendaciones:

1. Que el material transportado entre en contacto con la correa en la misma dirección de marcha y a la misma velocidad que aquella para así evitar desgastes prematuros;
2. Reducir al mínimo la altura de caída del material sobre la correa;

3. Que el material transportado se deposite en forma centrada sobre la correa;
4. En cargas con alto peso específico se deben utilizar rodillos portantes amortiguadores en la zona de carga;
5. Si el material transportado posee diferentes granulometrías, se sugiere utilizar un harnero de modo que en la descarga la parte más fina se deposite primero sobre la correa, lo cual actúa como un tipo de colchón a la caída de los fragmentos de mayor tamaño;
6. En caso de cargas irregulares que generan la discontinuidad de carga en la correa, es recomendable implementar alimentadores que logren una carga uniforme, los cuales pueden ser del tipo plancha inclinada por arrastre, de anillo sin fin, barras, cadena, correa, los que pueden ser fijos, vibratorios o rotativos.



5.4.2.2 Uso Correas Regenerativas de Transporte de Material. M23.2

Medida de diseño

Medida eléctrica

Una correa de alto ángulo puede ser definida como aquella correa que transporta material a lo largo de una pendiente que excede la estabilidad dinámica del material transportado. Son correas que logran recuperar la energía disipada en forma de calor (frenos) de las correas de transporte de material con pendiente positiva. La utilización de equipos de frenado regenerativo permite generar energía eléctrica utilizando la energía potencial gravitatoria de la correa. Permiten ingresar energía eléctrica al sistema de distribución de energía eléctrica local.

Por esta razón, las correas transportadoras que operan en descenso producto de la topografía de la faena presentan una pendiente negativa que genera las condiciones necesarias para producir energía eléctrica a través del uso de motores eléctricos asíncronos, gracias al peso que ejerce el mineral grueso sobre la correa, por lo que se les denomina correas regeneradoras. Básicamente, las correas transportadoras se componen por correas unidas por empalmes, estaciones de polines, contrapesos, y un sistema motriz compuesto por un reductor y un motor. Para lograr impulsar las correas, y poder superar así las resistencias mecánicas, se usa un motor eléctrico. En el caso de las correas regenerativas, se necesita una cantidad mínima de mineral grueso de aproximadamente 2.400 [t/h].

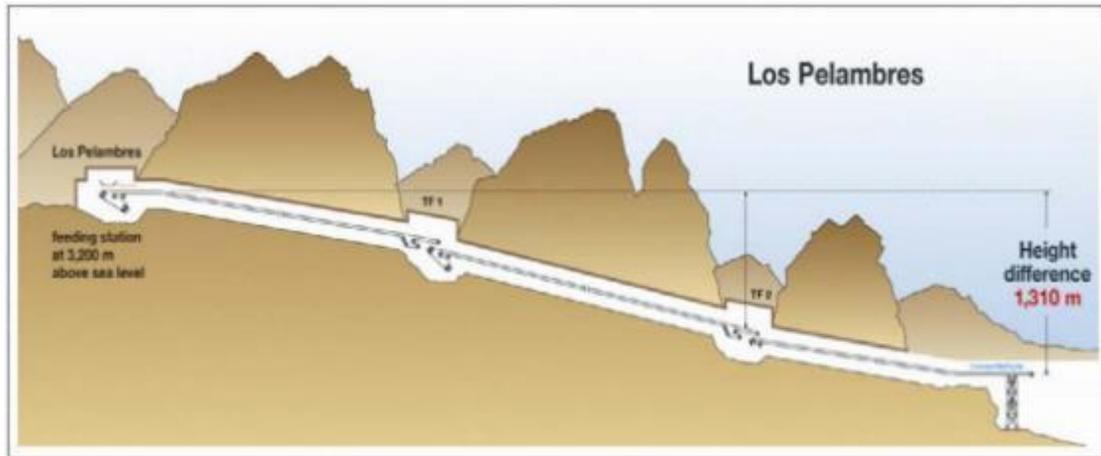


Figura: Correo regenerativa en Los Pelambres. Fuente: Universidad Santa María

<https://repositorio.usm.cl/handle/11673/46241>

5.4.2.3 Incorporación de accionamientos gearless en correas transportadoras. M23.3

Medida operacional

Medida eléctrica

La tecnología de transmisión sin engranajes (gearless) aumenta la confiabilidad y eficiencia. El sistema de accionamiento consta de un motor sincrónico sin reductor, lo que elimina las pérdidas en forma de calor de este último. La eficiencia del sistema completo aumenta entre el 3 y el 4%. La eliminación de una serie de componentes mecánicos y eléctricos aumentan la confiabilidad del sistema.

Esta solución de accionamiento gearless ofrece numerosas ventajas frente a la combinación usada en otras instalaciones de transporte por cinta, consistente en un motor de alta velocidad con reductor. Como el tamaño del motor no está limitado por el tamaño del reductor disponible, en caso necesario se puede prescindir de accionamientos multimotor. La potencia necesaria para accionar la cinta puede obtenerse con solo un accionamiento por cada polín. De este modo, la caseta de equipos puede tener un tamaño menor, lo que permite ahorrar espacio y peso.

Con la eliminación de una serie de componentes mecánicos y eléctricos aumenta la confiabilidad. La eficiencia del sistema completo aumenta entre el tres y el cuatro por ciento. Si se utilizan accionamientos gearless en lugar de los paquetes estándar con motor y reductor, se pueden ahorrar unos 40 rodamientos y ocho acoplamientos por cada cinta transportadora. El mantenimiento necesario del sistema de accionamiento también se reducirá claramente. Solamente los trabajos de mantenimiento de los reductores pueden representar hasta un cinco por ciento del coste de inversión original al año. En esta moderna solución también se puede prescindir de los sistemas de lubricación y refrigeración de los reductores, así como de su mantenimiento.



Figura: Accionamiento gearless en correas transportadoras. Fuente: Revista Minería Chilena

<https://www.mch.cl/2013/04/04/sistema-de-accionamiento-gearless-de-siemens-para-cintas-transportadoras-de-thyssenkrupp-en-mina-de-cobre-de-xstrata/>

5.4.2.4 Polines de baja resistencia. M23.4

Medida operacional

Medida eléctrica

Una medida de eficiencia energética factible de implementar en correas transportadoras tiene relación con la aplicación de mejoras en los sellos, ejes y en la forma en que se unen manto y tapas de los polines de las correas. El ahorro del consumo de energía puede llegar fluctuar entre un 20% y un 30%. Usualmente la mejora en la eficiencia energética de los sistemas es acompañada con una mayor disponibilidad de los sistemas de transporte, esto conlleva a tener polines con mejores índice y coeficiente de rodadura, reduciendo la resistencia.

Esta implementación puede estar acoplada a métodos de detección de fallas anticipadas o prematuras donde la monitorización es fundamental como parte de las buenas prácticas que se pueden aplicar en la cadena productiva, por ejemplo, sensores que van montados de manera simple en la estructura del sistema transportador, donde se obtienen las ondas ultrasónicas de trabajo, las cuales son analizadas en tiempo real mediante algoritmos que permiten alertar sobre condiciones anómalas de polines.



Figura: Polines de baja resistencia. Fuente: Revista Minería Chilena

Más información:

<https://www.mch.cl/informes-tecnicos/correas-transportadoras-mayor-conocimiento-y-tecnologia-2/#>

<http://www.biblioteca.digital.gob.cl/bitstream/handle/123456789/714/Anexo%20-%20Mapa%20Tecnologico%20de%20la%20Mineria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

<https://www.mch.cl/informes-tecnicos/correas-transportadoras-tecnologia-para-el-control-pre-ventivo-de-variables/>

5.4.3 Proyectos Implementados

<p>Gestión en operación correas transportadora</p> <p>Caso: Motores Stand by en correas overland</p> <p>MINERA EL ABRA</p>	<p>Medida:</p> <p>El diseño original de las correas CV202, CV205 considera su funcionamiento con cuatro motores de 900 kW cada una mientras que la correa CV206 funciona con tres motores de 900 kW. Después de realizar un estudio detallado del consumo de los motores se observa que estos se encontraban funcionando bajo su potencia nominal. Se realiza un estudio y se decide cambiar su configuración en las tres correas, dejando sin funcionar (en condición de stand by) un motor en cada una de ellas. Esta medida considera un ahorro de energía para las correas CV202, CV205 y CV206 de 8,9%, 6,2% y 32,6% respectivamente.</p>	<p>Reporte avance del convenio de cooperación entre ministerio de energía y consejo minero. Sociedad Contractual Minera El Abra</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte-EE-Freeport-El-Abra2019.pdf</p>
<p>Mantenimiento correa transportadora</p> <p>Mantenimiento de Correa Transportadora Overland 310-CV-013.</p> <p>SIERRA GORDA KGHM</p>	<p>Medida:</p> <p>Se observó que la correa Overland posee un factor de potencia muy pobre en relación a un parámetro óptimo (cercano al factor de potencia que presenta el Chancador primario), lo que implica que existen potenciales problemas de desalineamiento entre ejes de motor y correa o rodillos. Se mejora condición de Raspador primario y se instala raspador</p> <p>Secundario. Para poder instalar este raspador se instala una polea en el carro de alimentación (TRIPPER), con esto se reducen los tiempos de detención por limpieza. También se habilita una protección al motor para protegerlo ante sobrecargas por atollo o sobreesfuerzos por falla en alguna estación de polín o desalineamientos. Dicha protección se ajusta dependiendo de la posición en que este el carro alimentador</p>	<p>Reporte Avance del Convenio de Cooperaciones entre Ministerio de Energía y Consejo Minero</p> <p>SCM FRANKE- SIERRA GORDA SCM</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte-EE-KHGM2019.pdf</p>
<p>Gestión en operación correas transportadora</p> <p>Ahorro energía área seca por operación en vacío de correa</p>	<p>Medida:</p> <p>Existe operación de las correas en vacío a espera de carga durante largos periodos en los cuales existe un gasto de energía, pero sin materiales. Se desarrolla un algoritmo y sistema de control con el objetivo de detectar la presencia de carga desde el chancador y el sistema de correas hasta la entrada del molino. Con ello se evita la operación de correas en vacío por tiempos prolongados.</p>	<p>Reporte avance del Convenio de Cooperación entre Ministerio de Energía y Consejo Minero</p> <p>TECK RESOURCES CHILE. 2020</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte-EE-Teck2019.pdf</p>

<p>transportadora. TECK RESOURCES CHILE</p>	<p>Ahorro: Reducción energía: 0,9 [TJ]/año Reducción emisiones gases: 105 [tCO2-2]/año</p>	
<p>Incorporación de Gearless en correas transportadoras Caso: Incorporación de accionamiento Gearless en correas transportadoras. Minera Antapaccay en Perú</p>	<p>Medida: Instalación de transporte por cinta sin reductor en la mina de cobre de Antapaccay en Perú, de Xstrata Copper, situada a 4200 metros sobre el nivel del mar. Los accionamientos sin reductor contribuyen a aumentar la eficiencia y la confiabilidad de la instalación de correas transportadora y todo ello, con requisitos de mantenimiento mucho menores que los de las instalaciones convencionales. Ahorro A modo de ejemplo, en una instalación de 25.000 kW de potencia instalada se necesitarían cinco Gearless Drives, mientras que con equipos convencionales harían falta diez de 2.500 kW. De este modo, la maquinaria permitiría un incremento de eficiencia energética de 4%, lo que se traduce en un ahorro de 5.400.000 kWh al año. Lo anterior también se traduce en una disminución de las emisiones de CO2 en 4.900 toneladas por año.</p>	<p>Fuente: https://www.mch.cl/2013/04/05/exito-en-la-puesta-en-marcha-de-sistemas-de-accionamiento-gearless-para-cintas-transportadoras-y-molinos-de-mineral-en-una-mina-de-cobre-de-xstrata-en-peru/</p>
<p>Uso de IPCC Caso: IPCC (In-Pit Crushing and Conveying). Minera Sahuarita, Arizona, EEUU</p>	<p>Medida: Una tecnología en aumento de acarreo de material en las minas son los sistema del tipo IPCC (In-Pit Crushing and Conveying), en las operaciones del tipo rajo abierto. Un ejemplo de este sistema es el de la Mina de cobre en Sahuarita, Arizona, donde se desarrolló un sistema de transporte existente basado en la trituración y transporte estacionario de mineral dentro de la mina. El sistema se compone de tres trituradoras giratorias móviles de 1,5 * 2,2 m (60-89 pulgadas), una unidad de transporte, apiladora móvil, y 7,3 km de correa transportadores con una potencia instalada de 14000 KW. Ahorro: Este sistema permitió a la mina reducir la flota de camiones en un 25%. Además, los requerimientos promedio de camiones se redujeron en un 37%.</p>	<p>Fuente caso: https://www.researchgate.net/publication/270888181_Review_of_the_in-pit_crushing_and_conveying_IPCC_system_and_its_case_study_in_copper_industry</p>
<p>Uso de correas de transporte de material regenerativa. Minera Los Pelambres</p>	<p>Desarrollo de un sistema de correa transportadora en Minera Los Pelambres con capacidad de regenerar energía eléctrica. Este desarrollo buscó proponer una solución tecnológica novedosa que permitiera aprovechar la energía requerida a partir del frenado de la correa transportadora del material procesado en la Minera Los Pelambres. Lo anterior como consecuencia de la diferencia de altura (energía potencial), con un pendiente promedio del 11 % entre el lugar de extracción y de entrega del material.</p>	<p>http://old.acee.cl/576/articles-61166_doc_pdf.pdf</p>

5.5 Iluminación

5.5.1 Descripción

La iluminación en minería es un elemento fundamental no solo para dar luminosidad a los espacios, recintos y faenas sino también por motivos de seguridad. La visibilidad se vuelve un factor aún más importante en lugares donde la luz de día no logra llegar. Esto, en un contexto en que la industria deberá pasar cada vez más de una minería superficial a una de tipo subterránea.

El desafío es doble: por una parte los mandantes deben procurar establecer ambientes de trabajo más seguros y productivos –por lo que una buena iluminación es clave– y, por otra, deben cuidar los presupuestos y generar ahorros en un ítem como el consumo de electricidad que resulta clave para el levantamiento de un proyecto.

El artículo 101 del Reglamento de Seguridad Minera (Decreto Nº132 de diciembre 2002) es claro: “Ninguna persona podrá ingresar al interior de la mina, sin contar con un sistema de iluminación personal, aprobado por la administración para tal objetivo. Se deberá disponer de alumbrado de emergencia en todos los recintos, accesos, pasillos y vías de escape de una mina subterránea”. La iluminación personal y de emergencia, por tanto, es la base de una faena segura, pues un sector con mala iluminación es potencialmente riesgoso y podría generar altos costos por accidentes.



El objetivo entonces de la iluminación es entregar luz apropiada para la realización de las labores correspondientes en una faena, más allá de solo contar con la luz personal, de emergencia y de la maquinaria en uso.

El desafío entonces es no solo la creación de ambientes bien iluminados y propicios para trabajos, sino que también posean un bajo consumo eléctrico. En relación a las tecnologías, destaca el uso de

diodos emisores de luz (LED, por sus siglas en inglés) un sistema que permite ahorros entre un 50% y 80% del consumo frente a tecnologías tradicionales de iluminación.



En específico para la industria minera, además del LED, se deben considerar sistemas anticorrosivos, debido a los ambientes abrasivos en los que se pueden encontrar y de resistencia a las vibraciones, por la misma operación minera.

Fuente y mayor información:

<https://www.construccionminera.cl/iluminacion-de-tuneles-y-espacios-subterraneos-seguridad-y-eficiencia-energetica/#.YBFuCnZKjIU>

<https://www.revistaei.cl/informes-tecnicos/iluminacion-en-faenas-mineras-lo-esencial-es-la-adaptabilidad/>

5.5.2 Medidas de Eficiencia Energética

5.5.2.1 Uso de Iluminación LED. M24.1

Medida operacional

Medida eléctrica

Implementación de iluminación LED (Light Emitting Diode) de alta eficiencia en minería subterránea a modo de reemplazo de las tecnologías convencionales de iluminación. Esta tecnología se caracteriza por entregar una iluminación más focalizada, y a la vez por permitir dimensionar de manera precisa la luminosidad requerida. Asimismo, se caracteriza por no sufrir mayores inconvenientes al someterse a vibraciones, por resistir temperaturas que superan los 50°C, y por tener una capacidad de trabajo adecuada bajo condiciones de humedad relativa que oscila entre 10% y 95%.

Las lámparas LED utilizan desde un 40 a un 80% menos de electricidad que las de sodio de alta presión (HPS). Así también son 7 veces más eficientes energéticamente que las incandescentes y el doble de eficientes que las lámparas fluorescentes. Por otra parte, tienen una vida útil superior a las 50.000 horas, a diferencias de las fluorescentes que solo alcanzan las 8.000 horas o las de sodio de alta presión que alcanzan las 28.000 horas.



Fluorescente T8

36 W
8.000 horas
80-100 lumens/W



Sodio Alta Presión

70 W
28.000 horas
85-150 lumens/W



Fluorescente LED

18 W
>50.000 horas
100-200 lumens/W



LED Floodlight

10-500 W
>50.000 horas
100-200 lumens/W

Para la implementación de esta tecnología, apelando a un proyecto minero en sus primeras etapas de desarrollo, se recomienda llevar a cabo las soluciones de iluminación en la etapa de ingeniería de factibilidad cuyo diseño esté relacionado intrínsecamente con los criterios técnicos y operacionales. Para ello, se deben primeramente definir los requerimientos de iluminación (iluminancia) en LUX para los diferentes puntos a iluminar en donde se recomienda seguir los valores indicados en la siguiente tabla. Posteriormente, se deberá solicitar a los proveedores o quien realice el proyecto que garantice mediante simulaciones de iluminación que sea posible alcanzar estos niveles de iluminación para cada uno de los espacios requeridos a iluminar.

LUGAR O FAENA	ILUMINACION
Pasillos, bodegas, salas de descanso, comedores, servicios higiénicos, salas de trabajo con iluminación suplementaria sobre cada maquina o faena, salas donde se efectúen trabajos que no exigen discriminación de detalles finos o donde hay suficiente contraste.	150
Trabajo prolongado con requerimiento moderado sobre la visión, trabajo mecánico con cierta discriminación de detalles, moldes en funciones y trabajos similares.	300
Trabajo con pocos contrastes, lectura continuada en tipo pequeño, trabajo mecánico que exige discriminación de detalles finos, maquinarias, herramientas, cajistas de imprenta, monotipias y trabajos similares.	500
Laboratorios, salas de consulta y de procedimientos de diagnóstico y salas de esterilización.	500 a 700
Costura y trabajo de aguja, revisión prolija de artículos, corte y trazado.	1000
Trabajo prolongado con discriminación de detalles finos, montaje y revisión de artículos con detalles pequeños y poco contraste, relojería, operaciones textiles sobre género oscuro y trabajos similares.	1500 a 2000

Así también, en consideración al uso parcial de túneles y recintos se propone implementar un sistema de control automático de iluminación de encendido y apagado en base a sensores de presencia, manteniendo de todos modos valores mínimos de iluminación según requerimientos de seguridad.



Figura: Iluminación en minería subterránea. Fuente: Revista Minería Chilena

5.5.2.2 Sistemas de Control en Iluminación. M24.2

Medida operacional

Medida eléctrica, gestión

Incorporar sistemas de control para la iluminación, especialmente en minería subterránea, los cuales en base al uso de sensores de movimiento permitan trabajar a baja luminosidad cuando no exista presencia y a alta iluminación al paso de vehículos o trabajadores.

Para lograr estos usos específicos en forma automática y eficiente se utilizan los sistemas de control, los cuales se componen de sensores, controladores, interfaz de usuario, software de configuración a distancia de parámetros, entre otros, y tienen como fin el aumentar los índices de eficiencia energética mediante una gestión centralizada y control distribuido. En cuanto a las ventajas asociadas a estos sistemas, éstas se pueden resumir en:

- Control de intensidad lumínica en función de requerimientos específicos
- Mejora en el control de datos y parámetros energéticos

- Reducción de consumo energético
- Prolongación de vida útil de equipos e instalaciones
- Reducción de costos de mantenimiento de equipos e instalaciones

Desde un punto de vista cuantitativo, los sistemas de control en iluminación pueden permitir ahorros energéticos perfectamente de hasta un 20%.

Sumado a esto, otro aspecto importante es la selección de la tecnología de iluminación, a lo largo del tiempo se ha desarrollado un sinnúmero de mejoras que permiten reducir los consumos energéticos y aumentar la durabilidad de los sistemas de iluminación, por ejemplo, la tecnología LED tiene una mayor vida útil, permite reducir los costos de mantenimiento, reduce el consumo de energía, se incrementa la calidad de luz en relación con las tecnologías de sodio del pasado, tiene una menor emisión de calor, puede trabajar en temperaturas entre -40°C y 50°C y, también pueden contar con un sistema a prueba de fallos y cumplir todos los requerimientos de seguridad exigidos en la industria minera.

El uso conjunto de sistemas de control y uso de tecnologías LED permiten maximizar la eficiencia energética de los sistemas de iluminación para llegar a ahorros superiores a un 60%



Figura: Iluminación en minería subterránea. Fuente: Revista Minería Chilena

Más información:

<https://www.iluminet.com/luz-profundidades-iluminacion-mineria/>

<https://www.mch.cl/informes-tecnicos/sistemas-iluminacion-mineria-proveer-iluminacion-apropiada-constante/#>

<https://www.construccionminera.cl/iluminacion-de-tuneles-y-espacios-subterranos-seguridad-y-eficiencia-energetica/#.YAs6C-hKiUk>

<https://www.construccionminera.cl/tecnologias-de-iluminacion-mayor-visibility-para-la-construccion/#.YAs6DuhKiUk>

<https://pbegrp.com/es/power/tunnel-lighting/>

5.5.3 Proyectos Implementados

<p>Reemplazo de Luminarias Planta Concentradora Los Colorados</p> <p>MINERA ESCONDIDA BHP</p>	<p>Medida:</p> <p>Existía un porcentaje de luminarias fuera de servicios, otras luminarias. con bajo flujo lumínico en las áreas de molienda, flotación y remolienda. Reemplazo del 100% de las luminarias por tecnología de luminarias de sodio de alta presión a luminarias tipo LED</p>	<p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/09/reporte_EE_BHP2019.pdf</p> <p>Reporte avance del convenio de cooperación entre ministerio de energía y consejo minero</p>
<p>Cambio luminarias Alumbrado Público AP (LED).</p> <p>MINERA EL ABRA</p>	<p>Medida:</p> <p>Las fuentes emisoras de radiancia deben dar cumplimiento al DS 43 contaminación lumínica. Se selecciona luminaria LED. Lo que mejora la eficiencia energética (EE) y se da cumplimiento normativo al DS 43. El año 2018 se realizó el 25 % del reemplazo de AP de la Gerencia de Suministros y Servicios. Mejorando la Eficiencia Energética (EE) y cumplimiento normativo DS 43. El 2019 se subió a un 86% y para este año se ha extendido esta iniciativa a luminarias del tipo industrial y ornamental de exterior de edificios.</p> <p>Ahorro:</p> <p>4.700 MWh/Año</p>	<p>Reporte avance del convenio de cooperación entre ministerio de energía y consejo minero. Sociedad Contractual Minera El Abra</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_Freeport_El-Abra2019.pdf</p>
<p>Cambio luminarias en planta OSMOSIS (LED).</p> <p>MINERA EL ABRA</p>	<p>Medida:</p> <p>La iluminación de planta Osmosis de haluro metálico y luminarias de sodio, se reemplazó por luminarias LED que cuenten certificación SEC y cumplan con DS 43 contaminación lumínica. Mejora la eficiencia energética y cumplimiento normativo DS 43.</p> <p>Ahorro:</p> <p>1.500 MWh/año</p>	<p>Reporte avance del convenio de cooperación entre ministerio de energía y consejo minero. Sociedad Contractual Minera El Abra. 2020</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_Freeport_El-Abra2019.pdf</p>
<p>Cambio de Luminarias en nave de EW</p> <p>MINA RADOMIRO TOMIC-CODELCO</p>	<p>Medida:</p> <p>Las luminarias de la nave de electro-obtención eran de muy baja eficiencia, por lo que se hizo un recambio de luminarias por tecnología LED en nave de electro-obtención.</p>	<p>Reporte avance del convenio de cooperación entre Ministerio de Energía y Consejo Minero- CODELCO</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_Codelco2019.pdf</p>

<p>Reemplazo de Luminarias Convencionales por Led.</p> <p>MINERA LOMAS BAYAS</p>	<p>Medida:</p> <p>Se detecta un potencial de ahorro de energía y cumplir lo solicitado en DS 43. La iniciativa apunta a reemplazar las luminarias existentes en sector de correas transportadoras, mejorando las condiciones lumínicas, ahorro energético y mejoras de mantenimiento.</p> <p>Ahorro :</p> <p>37.230 MWh/ Año</p>	<p>Reporte avance del convenio de cooperación entre Ministerio de Energía y Consejo Minero</p> <p>Compañía Minera Lomas Bayas.2020</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte-EE-Glencore2019-Alto-norte-LomasBayas.pdf</p>
<p>Cambio de Iluminación SX MINERA SPENCE</p> <p>BHP</p>	<p>Medida:</p> <p>Se identifica un alto consumo y alta mantenibilidad en iluminación del área de SX. Se decide realizar un recambio de las luminarias por tecnología de bajo consumo LED. Cerca de 400 luminarias se cambiaron durante junio y diciembre del año 2019.</p> <p>Ahorro:</p> <p>150.488 KWh/ Año</p>	<p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/09/reporte-EE-BHP2019.pdf</p> <p>Reporte avance del convenio de cooperación entre ministerio de energía y consejo minero.</p>

5.6 Ventilación, Climatización y Aire Comprimido

5.6.1 Descripción

Corresponde al conjunto de procesos destinados al tratamiento de aire en minas, el cual corresponde a la herramienta más versátil de control atmosférico. Dicho proceso, es fundamentalmente empleado en minas subterráneas bajo el propósito de otorgar condiciones ambientales y termoambientales adecuadas para el personal de trabajo, así como también para atender la operación de diferentes equipos e instalaciones.



En minas subterráneas, la ventilación cumple con los siguientes objetivos:

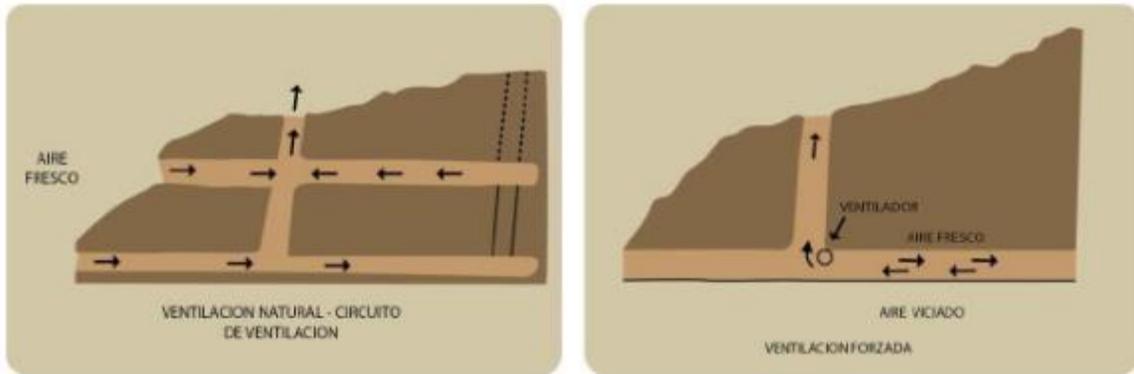
- Suministrar oxígeno
- Proporcionar el volumen de aire requerido para la maquinaria de combustión interna
- Evitar formación de mezclas explosivas
- Diluir y extraer gases nocivos y polvo en suspensión
- Controlar la temperatura

Ventilación General

Ventilación cuyo propósito es el suministro permanente de aire fresco y el retorno de aire viciado, mediante mecanismos naturales o forzados. El caudal de aire requerido depende de la cantidad de trabajadores, la extensión de la mina, el tipo de maquinarias a combustión interna y de las emanaciones de gases naturales asociadas a la mina.



Con relación a la ventilación natural, esta corresponde al movimiento de masas de aire al interior de las minas producto de diferencias de temperatura entre esta última y la superficie, así como también por la diferencia de altura entre las bocaminas. Este tipo de ventilación suele ser fluctuante, al depender de condiciones externas que no se pueden controlar.



Fuente: Ventilación en minas subterráneas

Por otra parte, la ventilación que opera bajo un circuito forzado utiliza ventiladores que corresponden a sistemas mecánicos que mediante una diferencia de presión generan el desplazamiento de una masa de aire. Como parte de la ventilación general, se encuentran los ventiladores primarios que usualmente se instalan en la superficie como un inyector o extractor de aire.

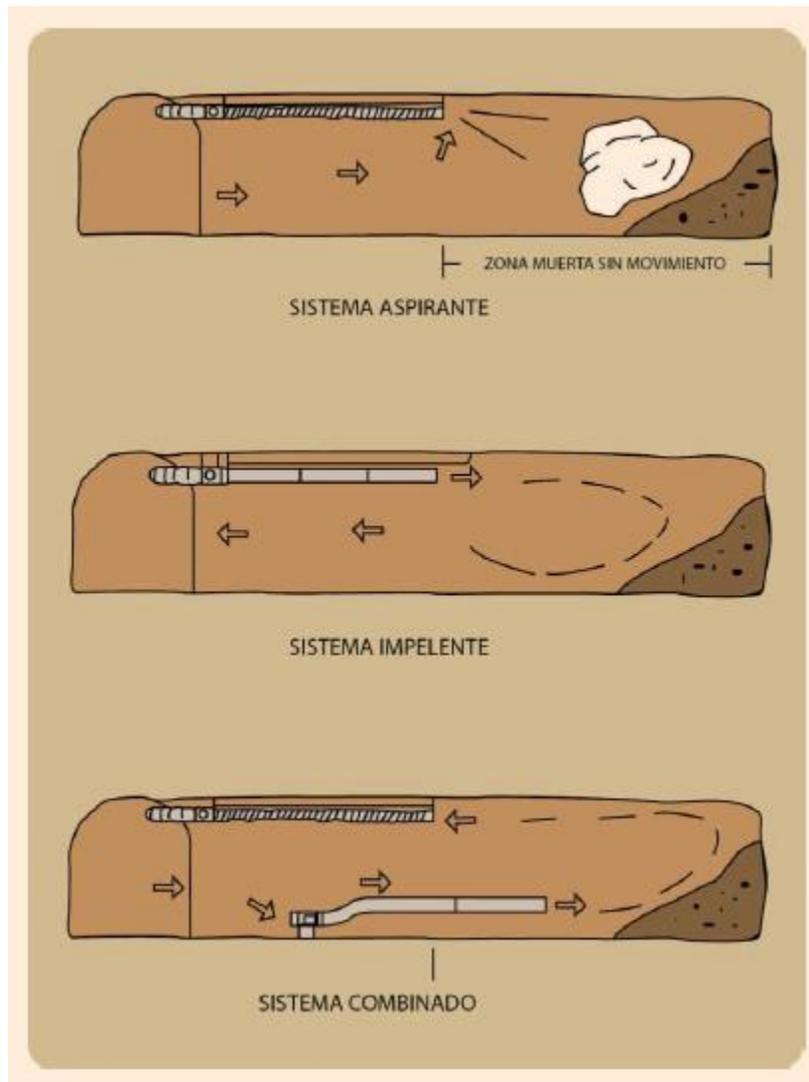


Fuente: Buenas prácticas en instalación de ventiladores y accesorios de ventilación

Ventilación auxiliar

La ventilación auxiliar se asocia a sistemas que, mediante el uso de ductos y ventiladores auxiliares, ventilan zonas restringidas de las minas subterráneas que son de difícil acceso para la ventilación general o primaria. Su objetivo es mantener las galerías en construcción y frentes de explotación bajo un ambiente apropiado, con un nivel de contaminación ambiental bajo con respecto a las concentraciones máximas permitidas.

En términos generales, un ventilador auxiliar o secundario es similar a un ventilador primario, pero se caracteriza por poseer una capacidad menor. Este, es instalado en un muro dentro de una galería o rampa equipado con puertas de ventilación.



Fuente: Ventilación en minas subterráneas

Uso de Aire Comprimido

La ventilación en base a aire comprimido se emplea frecuentemente en lugares difíciles de ventilar con aire natural o mediante circuitos de ventilación forzados. El aire comprimido es generado por un compresor y conducido al interior de la mina.



5.6.2 Medidas de Eficiencia Energética

5.6.2.1 Implementación de variadores de frecuencia en producción de agua de refrigeración. M25.1

Medida operacional

Medida eléctrica

Se recomienda instalar variadores de frecuencia en los equipos de impulsión asociados a la producción de agua de refrigeración, los cuales pueden resumirse en bombas asociadas al condensador, al evaporador, a las bombas que operan en la torre de pre-enfriamiento, a las bombas de alimentación, entre otras. El propósito de la implementación de variadores de frecuencia, la cual debe ir complementada con un sistema de control automático, consiste en alinear el funcionamiento del sistema de producción de agua de refrigeración con la demanda actual, lo cual se traduce finalmente en un ahorro energético a causa de la reducción de consumo eléctrico. Para identificar los beneficios energéticos de esta implementación, se recomienda determinar una línea base, es decir, determinar el consumo de electricidad que no considera la instalación de variadores de frecuencia y del sistema de control automático; asimismo, se recomienda determinar el consumo eléctrico después de la implementación de estas tecnologías, para de esta forma estimar la diferencia entre estos dos consumos, cuantificando así el impacto energético resultante.



Cabe señalar que un variador de frecuencia es un dispositivo electrónico que permite variar la velocidad rotacional de un motor, actuando sobre la frecuencia de la corriente eléctrica. De esta forma, en un equipo de impulsión, es posible llevar a cabo su accionamiento a diferentes velocidades de tal manera que la combinación caudal-presión que suministre sea lo más versátil posible, garantizando la máxima eficiencia y ahorro energético. Los principales parámetros de accionamiento de un variador de frecuencia son:

- Velocidad máxima: valor de frecuencia de la tensión generada por el variador a la cual se da la velocidad máxima, el que se mide en Hz y alcanza valores de 240 Hz, siendo lo usual 60 o 60 Hz.
- Velocidad mínima: valor de frecuencia de la tensión generada por el variador a la cual se da la velocidad mínima y se entrega como un porcentaje de la velocidad máxima con valores que van desde -100% a 100%, siendo lo usual 0%.
- Tiempo de aceleración: tiempo que tarda el variador de frecuencia en pasar de 0 a la máxima velocidad. Este parámetro puede variar entre 0 a 3.000 segundos.
- Tiempo de desaceleración: tiempo que tarda el variador de frecuencia en pasar de la máxima velocidad, a cero. Este parámetro puede variar entre 0 a 3.000 segundos.
- Frecuencia base: frecuencia a la cual la máxima tensión es alcanzada, puede variar entre 25 a 240 Hz, siendo lo frecuente 50 o 60 Hz.

Respecto a los beneficios técnicos asociados a la implementación de variadores de frecuencia, estos se pueden resumir en los siguientes²:

- Un variador de frecuencia se caracteriza por no requerir de excesiva instrumentación eléctrica y mecánica como ocurre con un sistema regulador tradicional.
- No requiere la instalación de válvulas y reguladores de compuertas, debido a que el flujo másico o presión se regulan mediante el mismo variador de frecuencia.
- En términos generales, un variador de frecuencia con un coseno igual a 1 proporciona una corrección del factor de potencia para³ el $\cos(0)$ del motor, lo cual implica que no se

² Fuente: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2516&ni=por-que-utilizar-un-convertidor-de-frecuencia-para-controlar-ventiladores-y-bombas>

³ Fuente: Optimization of energy use for mine ventilation fan with variable speed drive

requieren tomar medidas para el $\cos(\theta)$ del motor cuando se dimensiona la unidad de corrección del factor de potencia.

- No se requiere la implementación de un arrancador estrella/triángulo o un partidador suave cuando se utilizan convertidores de frecuencia.

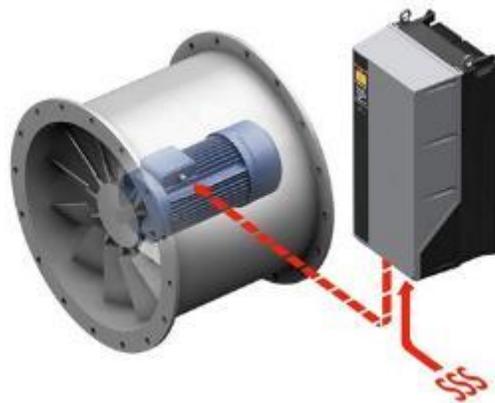
En cuanto al ahorro energético asociado a esta implementación, se estima que sea del orden del 20% al 50%.

5.6.2.2 Implementación de variadores de frecuencia en ventilación. M25.2

Medida operacional

Medida eléctrica

Usualmente, los ventiladores empleados en minería trabajan a una velocidad constante para mantener un flujo de aire suficiente que permita proveer un entorno saludable a los trabajadores. Sin embargo, este método de funcionamiento no responde necesariamente a un escenario eficientemente energético. Por ello, es que se propone implementar variadores de frecuencia como alternativa a los controladores de velocidad constante y a los dispositivos de estrangulación como amortiguadores y válvulas. Concretamente, un variador de frecuencia se utiliza para aplicaciones en las que el control de velocidad tiene una preponderancia esencial debido a constantes y/o repentinos cambios de carga. De esta manera, un variador de frecuencia permite ajustar la operación del o los ventiladores en función de la demanda que exista en un lugar y momento determinados.



Respecto a los variadores de frecuencia, estos corresponden a dispositivos electrónicos que permiten variar la velocidad rotacional de un motor, actuando sobre la frecuencia de la corriente eléctrica. De esta forma, en un equipo de impulsión, es posible llevar a cabo su accionamiento a diferentes velocidades de tal manera que la combinación caudal-presión que suministre sea lo más versátil posible, garantizando la máxima eficiencia y ahorro energético. Los principales parámetros de accionamiento de un variador de frecuencia son:

- Velocidad máxima: valor de frecuencia de la tensión generada por el variador a la cual se da la velocidad máxima, el que se mide en Hz y alcanza valores de 240 Hz, siendo lo usual 60 o 60 Hz.

- Velocidad mínima: valor de frecuencia de la tensión generada por el variador a la cual se da la velocidad mínima y se entrega como un porcentaje de la velocidad máxima con valores que van desde -100% a 100%, siendo lo usual 0%.
- Tiempo de aceleración: tiempo que tarda el variador de frecuencia en pasar de 0 a la máxima velocidad. Este parámetro puede variar entre 0 a 3.000 segundos.
- Tiempo de desaceleración: tiempo que tarda el variador de frecuencia en pasar de la máxima velocidad, a cero. Este parámetro puede variar entre 0 a 3.000 segundos.
- Frecuencia base: frecuencia a la cual la máxima tensión es alcanzada, puede variar entre 25 a 240 Hz, siendo lo frecuente 50 0 60 Hz.

Respecto a los beneficios técnicos asociados a la implementación de variadores de frecuencia, estos se pueden resumir en los siguientes⁴:

- Un variador de frecuencia se caracteriza por no requerir de excesiva instrumentación eléctrica y mecánica como ocurre con un sistema regulador tradicional.
- No requiere la instalación de válvulas y reguladores de compuertas, debido a que el flujo másico o presión se regulan mediante el mismo variador de frecuencia.
- En términos generales, un variador de frecuencia con un coseno igual a 1 proporciona una corrección del factor de potencia para⁵ el $\cos(0)$ del motor, lo cual implica que no se requieren tomar medidas para el $\cos(0)$ del motor cuando se dimensiona la unidad de corrección del factor de potencia.
- No se requiere la implementación de un arrancador estrella/triángulo o un partidor suave cuando se utilizan convertidores de frecuencia.

En cuanto al ahorro energético asociado a esta implementación, se estima que sea del orden del 20% al 50%.

5.6.2.3 Implementación de estrategia de control en proceso de ventilación subterránea. M25.3

Medida operacional

Medida eléctrica

El control de la ventilación es esencial para el funcionamiento de una mina en términos de seguridad. Concretamente, el objetivo del sistema de control en minería es proporcionar una óptima calidad del aire mediante el manejo de los gases O₂, CH₄, CO, SO₂, H₂S, NO₂ y/o CO₂ en los frentes de extracción de la mina, llevándose esto a cabo mediante el ajuste constante del flujo másico de aire de ventilación en función de la demanda existente en un momento y lugar determinados. El proceso de ajuste del funcionamiento de los ventiladores en función de la demanda existente se conoce en inglés como Ventilation On Demand, o Ventilación a Pedido, el que se puede categorizar en 5 estrategias de control:

⁴ Fuente: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2516&ni=por-que-utilizar-un-convertidor-de-frecuencia-para-controlar-ventiladores-y-bombas>

⁵ Fuente: Optimization of energy use for mine ventilation fan with variable speed drive

1. Control manual. Los ventiladores se pueden encender o apagar manualmente. Las puertas y reguladores también pueden ser controlados manualmente. Por otra parte, los ventiladores pueden equiparse con variadores de frecuencia para el ajuste de velocidad.
2. Programación diaria. Los cambios de la red planificados se producen bajo un patrón de encendido/apagado predeterminado diario y ya no se aplican manualmente.
3. Basado en eventos. El flujo másico de aire generado cambia en función de las actividades que se realicen dentro de la mina. Esto incluye sistemas tales como impulsores de coordenadas y ventiladores de cabecera sin salida. A modo de ejemplo, en este tipo de estrategias de control, una respuesta de control puede darse en caso de incendio u otros eventos inesperados.
4. Etiquetado. Los requisitos de ventilación se evalúan en base a aspectos de control de calidad, así como de la posición y las características de vehículos y otros elementos contaminantes.
5. Ambiental. Las redes responden automáticamente a cualquier cambio en las condiciones ambientales del subsuelo. Este consiste en un control de calidad basado en datos ambientales en tiempo real, que podría incluir una serie de entradas de sensores para gas, polvo, partículas de diésel y temperatura.

En términos generales, las características asociadas a cada estrategia se pueden resumir en las siguientes:

Nivel	Estrategia de Control	Software	PLC (Programable Logic Controller)	Comunicación (ventiladores principales y auxiliares, puertas y reguladores)	Sensor de flujo de aire	Sensores ambientales	Etiquetado y Seguimiento
1	Manual	L1	•	•	Opcional	-	-
2	Programación diaria	L2	•	•	Opcional	-	-
3	Basado en eventos	L3	•	•	Opcional	Opcional	-
4	Etiquetado	L4	•	•	•	Opcional	•
5	Ambiental	L5	•	•	Opcional	-	Opcional



En cuanto a los ahorros energéticos, la implementación de una estrategia de control en el proceso de ventilación dentro de una mina puede alcanzar incluso un 68%⁶.

5.6.2.4 Minimización de uso de aire comprimido mediante auditorías. M25.4

Medida operacional

Medida eléctrica

Existen diversas formas de aumentar la eficiencia en los sistemas de aire comprimido, los cuales son presentados en los siguientes puntos:

- **Automatización de la operación:** El aire comprimido muchas veces opera de manera manual y con varios equipos simultáneamente, generando más aire comprimido del necesario. Una medida de eficiencia es automatizar la operación del aire comprimido para una operación más eficiente, disminuyendo el consumo de energía eléctrica considerablemente, además del mantenimiento constante para evitar fugas.
- **Auditorías de sistemas de aire comprimido:** No existen sistemas sin auditar sin oportunidades de mejorar su calidad de aire y rendimiento. Los ahorros típicos presentados en la sola reducción de los costos de operación fluctúan entre 25% y 40%. En casos extremos encontramos sistemas en donde los ahorros son de 10% y 90%. En la mayoría de los casos los retornos de inversión son menores a dos años, incluyendo el costo de la auditoría. En el mejor de los casos, el retorno de inversión es de medio año. Un sistema de aire comprimido limpio y seco, a una presión constante ($\pm 0,5-1\%$) en todos los puntos de la planta, soportará a cada aplicación de una forma más consistente, confiable y sostenible. En dichas condiciones, el rendimiento y eficiencia de la planta mejorará, lo que se traducirá en menores costos de producción.
- **Simulaciones:** Las continuas mejoras en el hardware informático han dado lugar a importantes avances en la tecnología de software. En consecuencia, la simulación computacional se ha convertido en una herramienta cada vez más valiosa para ser utilizada en muchas industrias. Las ventajas de utilizar simulaciones en industrias son numerosas - en su mayoría, la capacidad de probar nuevas políticas, procedimientos operativos y métodos sin interrumpir el sistema real es lo que hace que las simulaciones sean atractivas. Las simulaciones

⁶ Fuente: Cost-saving electrical energy consumption in underground ventilation by use of ventilation on demand

se utilizan para probar e identificar modificaciones de mejora de energía y operativas en sistemas de aire comprimido de minería.



Más información:

» [Ahorros de un 30% del consumo eléctrico en la instalación de aire comprimido y de hasta un 90% de aprovechamiento de la energía consumida por los compresores \(mch.cl\)](#)

» [Aire comprimido: auditorías a sistemas \(mch.cl\)](#)

<http://www.cecamin.com/cursos/sistemas-de-ventilacion-para-minas-metalicas.php>

http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-78902018000300007

5.6.2.5 Selección adecuada de compresores y su respectivo rendimiento. M25.5

Medida de diseño

Medida eléctrica

La eficiencia de un compresor se expresa como la razón entre la energía suministrada y el trabajo realizado. Este parámetro es un buen indicador para determinar cuán efectiva es la producción de aire comprimido en base a la inyección de energía eléctrica. Mientras mayor es la eficiencia, mayores son los posibles ahorros asociados a la producción de aire comprimido, por esta razón, se recomienda considerar

En términos prácticos, la eficiencia puede determinarse dividiendo el flujo del volumen de suministro del compresor por la potencia real consumida cuando funciona a plena carga, tal como se muestra a continuación:

$$\eta_p = \frac{Q_v}{\dot{W}_{actual}}$$

Donde,

Q_v es el flujo volumétrico de aire comprimido [m^3/h o CFM]

W_{actual} es la energía suministrada

La selección y/u orden secuencial de los compresores tiene un rol esencial para obtener resultados eficientemente energéticos dentro de un sistema dado sin hacer grandes cambios en él. Los compresores menos eficientes consumen más energía eléctrica para suministrar la misma cantidad de aire comprimido que las máquinas más eficientes. Por esta razón, es relevante priorizar a los compresores de mayor eficiencia dentro un sistema de aire comprimido para asegurar que éstos operen durante un mayor periodo de tiempo respecto a las máquinas menos eficientes⁷.

5.6.2.6 Implementación de variadores de frecuencia en sistema de compresión de aire. M25.6

Medida operacional

Medida eléctrica

Los variadores de frecuencia corresponden probablemente a la tecnología más efectiva para controlar la eficiencia de un compresor centrífugo. Dicho dispositivo, permite variar la velocidad de rotación del compresor, permitiendo ajustar la velocidad en función de la demanda existente, generando de esta manera una reducción del consumo energético.

Por otra parte, el compresor centrífugo tiene una característica de torque/velocidad cuadrática (el torque es proporcional al cuadrado de la velocidad). Esto implica teóricamente que la potencia se reducirá con el cuadrado de la velocidad cuando ésta se reduzca desde un valor determinado. Esto permitirá lograr un ahorro considerable sin desperdiciar aire comprimido.

Los beneficios asociados al control de velocidad rotacional en los compresores son:

- Alta fiabilidad y disponibilidad.
- Bajo costo de mantenimiento.
- Alto tiempo de actividad y aumento de horas productivas.
- Funcionamiento del compresor en el rango óptimo de velocidad/potencia.
- Alta eficiencia.
- Menores emisiones de CO₂.

La experiencia da cuenta que, al implementar variadores de frecuencia en los sistemas de compresión de aire, es posible alcanzar ahorros de energía del orden de un 15%.

5.6.2.7 Canalización de aire exterior hacia entrada de compresores. M25.7

Medida operacional

Medida eléctrica

La eficiencia energética de un sistema de compresión de aire puede ser mejorada reduciendo la temperatura del aire de alimentación que ingresa a los compresores. Las investigaciones han demostrado que el uso de aire exterior a menor temperatura en lugar de aire caliente de la sala de

⁷ Fuente: Energy efficiency opportunities in mine compresses air systems

compresores puede ahorrar hasta un 6% de la potencia del compresor. El ahorro de energía puede estimarse en base a la siguiente ecuación⁸:

$$\text{Energía ahorrada [kWh]} = \frac{1\% \cdot P \cdot T}{3} \cdot t$$

Donde,

P es la potencia del compresor [kW].

T es la reducción de temperatura [°C].

t son las horas trabajadas en un año.

La forma más sencilla de reducir la temperatura de entrada (T) es utilizar el aire exterior en lugar del aire caliente de la sala de compresores, mediante la canalización del aire exterior hacia la entrada del compresor. En particular, si el aire se extrae de una fuente fría y seca, el sistema funcionará de manera más eficiente.

5.6.2.8 Refrigeración intermedia en etapas de compresión de aire comprimido. M25.8

Medida de diseño

Medida eléctrica

Dentro de un proceso de compresión por etapas, se debe tener un sistema enfriador del aire que reduzca la temperatura del aire comprimido después de cada etapa de compresión, debido a que dichas temperaturas suelen ser elevadas, lo cual en efecto reduce la eficiencia del proceso en su conjunto. A continuación, se muestran temperaturas de salida promedios en función de diferentes tipologías de compresor.

Tipo de compresor	Temperatura promedio aire de salida [°C]
Rotatorio lubricado con aceite	93,3
Rotatorio sin aceite	176,6
De pistón de dos etapas	148,8
Centrífugo	107,2

Para llevar a cabo esta mejora, se sugiere instalar un post enfriador entre etapas, el cual consiste en un intercambiador de calor refrigerado por agua o aire, y el cual permite enfriar el aire comprimido dentro de los 2,7°C a 11°C respecto a la temperatura ambiente. Cabe señalar que, a causa del proceso de enfriamiento del aire comprimido, usualmente se produce condensación debido a la presencia de vapor de agua a ingresar éste al intercambiador de calor; no obstante, este condensado es eliminado mediante un separador de humedad instalado en la descarga del post enfriador.

En particular, un post enfriador permite:

⁸ Fuente: Energy efficiency opportunities in mine compressed air systems

1. Enfriar el aire comprimido.
2. Reducir los niveles de humedad del aire comprimido.
3. Aumentar la capacidad del sistema.
4. Proteger los equipos posteriores del calor excesivo.
5. Reducir el riesgo de que las tuberías de aire comprimido caliente provoquen un incendio.

5.6.2.9 Implementación de secadores de aire y trampas de secado en sistema de compresión de aire. M25.9

Medida operacional

Medida eléctrica

El proceso de compresión de aire trae consigo la generación de condensado de agua debido a la disminución de la presión de vapor relativa, lo cual se conoce como humedad relativa. La temperatura a la que se produce este proceso de condensación bajo una presión superior a la atmosférica se conoce como punto de rocío a presión. La mayoría de los equipos especifican el punto de rocío de la presión de trabajo requerido, dato que se requiere para seleccionar un secador de aire adecuado que permita eliminar el condensado generado, el cual es un factor importante de erosión y corrosión dentro de un sistema de compresión. Asimismo, se requiere investigar ciertos requisitos del sistema para evitar que el aire se seque por debajo del punto de rocío a presión requerido.

Para eliminar el líquido resultante de la condensación, es necesario instalar trampas de condensado, las que se instalan en el sistema de aire comprimido después de los separadores de humedad, post enfriadores, secadores refrigerados y filtros. Las trampas de condensado automáticas se utilizan para conservar la energía evitando la pérdida de airea través de las válvulas abiertas. Por otra parte, en los drenajes manuales de condensado, las válvulas deben ser abiertas por los propios operadores y a menudo se dejan abiertas para drenar continuamente el condensado, generando que el aire comprimido salga continuamente del sistema. Las trampas mal mantenidas desperdician mucho aire comprimido a largo plazo, lo cual ha de generar un consumo energético excesivo. A continuación, se presentan cuatro metodologías para drenar condensados del sistema de compresión:

- Manual.
- Uso de trampas mecánicas accionadas por niveles.
- Uso de válvulas solenoides de funcionamiento eléctrico.
- Uso de trampas de cero pérdidas de aire con depósitos.

Se recomienda instalar trampas automáticas de condensado para prevenir cualquier pérdida innecesaria de aire comprimido y daños en todo el sistema.

5.6.2.10 Minimización de pérdidas de presión en sistema de compresión de aire. M25.10

Medida operacional

Medida eléctrica

La caída de presión es un término utilizado para describir la reducción de la presión del aire desde la descarga del compresor hasta el punto de servicio. Las caídas de presión excesivas provocan un rendimiento deficiente del sistema y un alto consumo de electricidad. Por tanto, éstas deben minimizarse desde la etapa de diseño y con un mantenimiento regular. El equipo de tratamiento de aire,

como post enfriadores, secadores, separadores, filtros, entre otros, deben seleccionarse para asegurar la menor caída de presión posible en las instancias de mayor exigencia del sistema. En efecto, un sistema bien diseñado tendrá una caída inferior al 10%.

Existen formas adicionales de minimizar las caídas de presión, las que se detallan a continuación:

- Diseño adecuado del sistema de distribución durante la instalación del sistema.
- Operación y mantenimiento de filtros de aire y secadores para reducir los efectos de la humedad en el sistema, efectos tales como la corrosión.
- Minimización de distancias entre el punto de generación y de servicio.
- Especificación de características de reguladores de presión, lubricadores, mangueras y conexiones, de tal forma de reunir las características apropiadas de rendimiento con las menores pérdidas de presión posibles.

5.6.2.11 Mitigación de fugas en sistema de compresión de aire. M25.11

Medida operacional

Medida eléctrica

Las fugas son unas de las principales causales de pérdidas de energía en un sistema de aire comprimido. Estas se caracterizan por ser difíciles de rastrear ya que puede proceder de cualquier parte del sistema, no obstante, se pueden reconocer las áreas frecuentemente problemáticas, las que pueden resumirse en:

- Acoplamientos, mangueras, tubos y accesorios.
- Reguladores de presión.
- Trampas de condensado abiertas y válvulas de cierre.
- Juntas de tuberías, desconexiones y selladores de roscas.

En sistemas semiautomáticos donde los compresores tienen controles de arranque/parada o de carga/descarga es posible identificar las fugas del sistema. Cabe señalar que es de relevancia realizar este testeado cuando no hay demanda (todo el equipo de servicio debe estar apagado). De esta forma, las fugas harán que los compresores funcionen en ciclos debido a las caídas de presión en el sistema a medida que el aire se escapa a través de aquéllas.

Por otra parte, se pueden implementar programas de prevención de fugas, los que se pueden resumir en dos: el programa de Búsqueda y Reparación, y el programa de Etiqueta de Fugas. En el primero, las fugas se reparan tan pronto como se detectan. Por otro lado, en el segundo, las fugas se registran e identifican mediante una etiqueta, llevando a cabo la tarea de reparación en una etapa posterior. Ahora bien, independientemente de qué programa se realiza, es importante asegurarse de incluir los siguientes elementos en la ejecución de esta tarea:

- Establecer una línea base para el uso (o consumo) de aire comprimido.
- Determinar las pérdidas en el sistema causadas por fugas.
- Calcular el costo asociado a las fugas de aire.
- Identificar nuevas fugas de aire.
- Registrar las fugas identificadas.
- Priorizar la reparación de fugas.
- Ajustar parámetros de compresor.

- Registrar las reparaciones para futuras tareas.
- Comparar la línea base con el programa de prevención de fugas.
- Reiniciar el programa.

La ventaja de un buen programa de reparación de fugas en un sistema de aire comprimido es que éste mantendrá en el tiempo su eficiencia, fiabilidad, estabilidad y rentabilidad⁹.

5.6.2.12 Implementación de una estrategia de control en sistema de compresión de aire. M25.12

Medida operacional

Medida eléctrica

Para la implementación de una estrategia de control se deben identificar claramente las variables del proceso a controlar. En este sentido, la principal variable de control a considerarse es la presión requerida en el sistema, la cual variará en función de la demanda existente, y la cual debe controlarse de manera correcta con el fin de no afectar negativamente el funcionamiento de otros componentes. Para esto último, es necesario gestionar eficazmente la implementación de un sistema de control en el cual se priorice la seguridad de los trabajadores.

Para implementar un sistema de control apropiado y efectivo para el manejo del sistema de aire comprimido, se deben integrar los siguientes conceptos:

- Una Sala de Control Central (SCC).
- Selección y control de compresores.
- Control de presión.

Una **sala de control central** corresponde al elemento principal de sistema de aire comprimido desde el cual se puede supervisar y controlar todo el sistema. Los beneficios asociados a su implementación se enumeran a continuación:

1. Monitorización y control centralizado del sistema de aire comprimido.
2. Los datos históricos del sistema se encuentran registrados.
3. Los cambios en el sistema pueden detectarse y ser rectificadas.
4. Se pueden reducir al mínimo las pérdidas innecesarias de energía.

En efecto, las ventajas de tener un espacio central de vigilancia y control son realmente impactantes, lo cual es posible gracias a varios instrumentos de campo que están conectados a este conjunto de control central.

Por otra parte, el concepto de **selección y control de compresores** respecta a la selección de las maquinarias más eficientes y a la optimización del número de aquéllas en un momento dado, así como a la optimización de las operaciones asociadas a los compresores de forma individual.

La selección de los compresores más eficientes se puede realizar determinando el rendimiento de cada uno de ellos, cuya estimación se puede llevar a cabo mediante el uso del software de control. Por otra parte, el control eficiente se puede establecer haciendo uso de un SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). En la siguiente ilustración se muestra cómo un sistema SCADA se integra con el resto de la planta. Es importante notar que éste se conecta al resto del equipo de

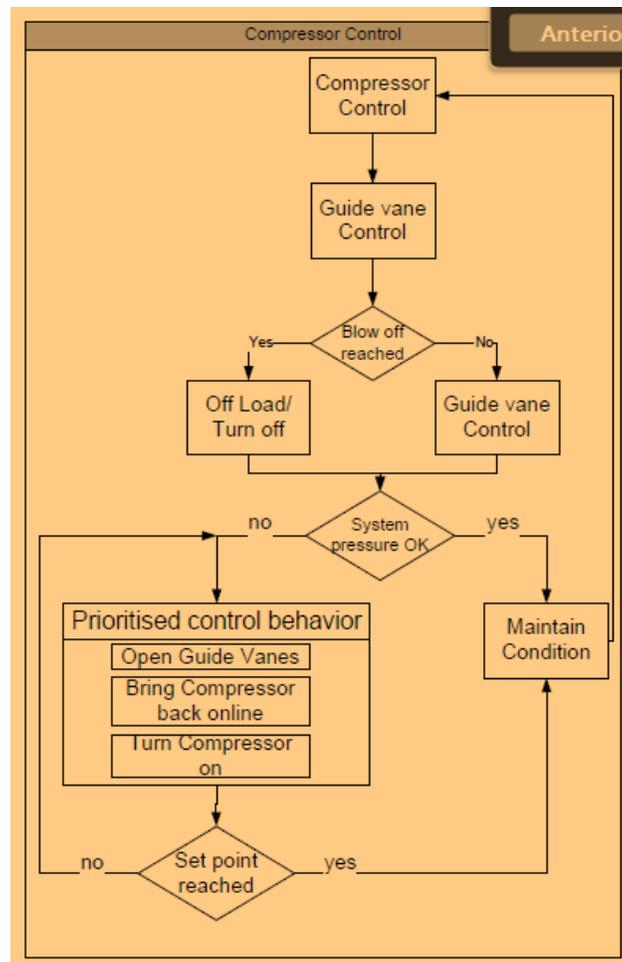
⁹ Energy Efficiency opportunities in mine compressed air systems

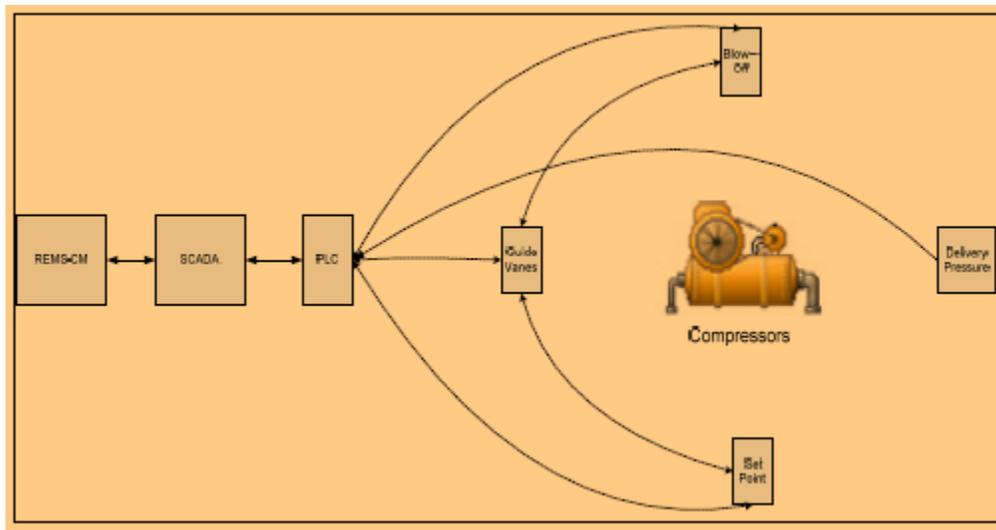
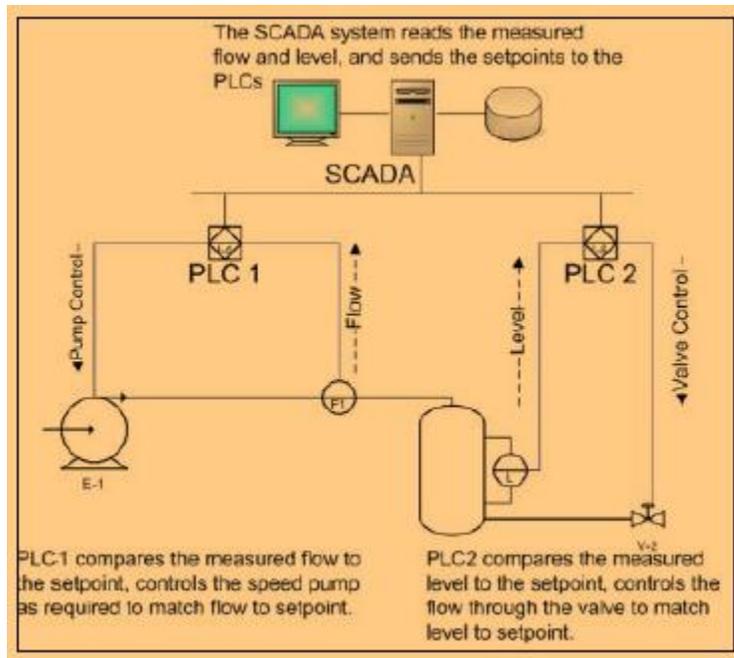
campo a través de un PLC, el que está programado para controlar los componentes del sistema según los insumos específicos de diversos instrumentos de campo.

Para el caso del compresor, a modo de ejemplo, los parámetros de ajuste pueden ser programados en el PLC, o el PLC puede pedir el parámetro de ajuste desde el SCADA. Esto hace posible que:

- Un operador o el software de control altere dicho parámetro según como lo requiera el sistema.
- Los perfiles de presión de cada uno de los principales puntos de servicios de aire comprimido durante un periodo de 24 horas podrían ser alterados mediante el software de control.
- Un programador de compresores que forma parte de este último utiliza varias entradas de diferentes instrumentos de campo para programar el orden de los compresores y la cantidad de ellos que operan.

El **control de la presión** es un elemento de relevancia para el control del sistema de aire comprimido, y el que incide directamente en el consumo energético. En efecto, cuanto mejor sea el control de este parámetro, mayor será el ahorro energético. Cabe señalar que el proceso de control de la presión corresponde a un proceso continuo, ya que la demanda de aire comprimido puede variar mucho a lo largo del día.





5.6.2.13 Instalación adecuada de ventiladores primarios en minería subterránea. M25.13

Medida de diseño

Medida eléctrica

Por lo general, los ventiladores primarios son diseñados e instalados para operar continuamente sobre el collar de un pozo o en la bocamina de una galería de extracción. Estos, pueden ser del tipo axial o centrífugo, lo cual depende de las presiones a desarrollar. Asimismo, estos pueden ser instalados como una única unidad o bajo una configuración compuesta por múltiples ventiladores dispuestos en paralelo.

Por su importancia, el ventilador primario debe ser instalado en una cámara especial, además de ser equipado de monitores y accesorios para detectar fallas y activar los mecanismos de alerta en

caso de emergencia. Para garantizar una operación eficiente de los ventiladores primarios, estos deben instalarse en terrenos estables, libre de fracturas, y equipado con instrumentos que faciliten un mantenimiento adecuado. Asimismo, se sugiere que todos los ventiladores posean las mismas características (tipo y tamaño), y sean instalados en ductos paralelos, separados por un ángulo de deflexión menor a 50° .

La figura a continuación muestra un esquema sobre la instalación de ventiladores en la salida de una mina metálica. Dicha instalación incluye una cámara de acople, una cámara de seguridad, fundaciones, dos ductos en paralelo y dos ventiladores centrífugos. Cada ventilador consiste de un ducto de entrada en posición horizontal, una carcasa, un difusor vertical, un rotor y un motor. El ducto de entrada lleva una puerta automática en un extremo y un regulador de alabes en otro. La puerta automática sirve para evitar la recirculación del aire cuando un ventilador es apagado, la cual se mantiene cerrada hasta que se enciende el dispositivo. El regulador, el que es un mecanismo operado por un actuador (RVC), tiene el fin de cambiar el punto de operación del ventilador cambiando su área transversal. En cuanto al rotor, este se conecta al eje del motor a través de una caja de engranajes. En este caso, y con el fin de reducir pérdidas de energía por turbulencia y choque, los ductos son orientados con una deflexión menor a 25° en relación con el eje de la galería. Cabe señalar que una orientación asimétrica causa un envejecimiento rápido de partes, turbulencia y golpes de aire que pueden resultar en destrucción de uno de los ventiladores.

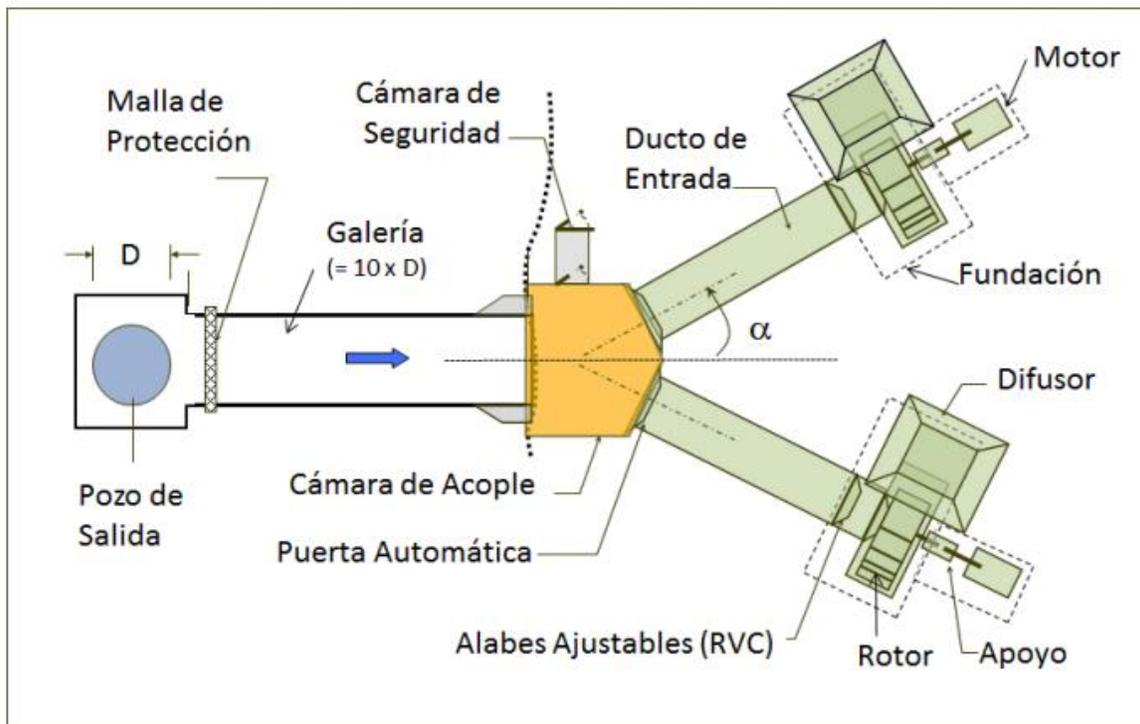


Figura: Instalación de ventiladores centrífugos en paralelo. Fuente: Documento “Buenas prácticas en instalación de ventiladores y accesorios de ventilación.”

Una vez concluida la instalación, cada ventilador debe ser probado para medir rendimiento y por condiciones de seguridad. En la práctica, eso implica hacer mediciones de factores tanto en el ventilador como en las construcciones. Estos factores son medidos bajo diferentes condiciones de operación, incluyendo operación del ventilador sin carga, con carga parcial y carga total. En una mina,

estas condiciones se crean abriendo y cerrando las puertas de control. Respecto a los principales factores a medir, estos son: nivelación y alineación de elementos y partes constructivas, vibración del ventilador, temperaturas del motor y apoyos, y la capacidad del ventilador. Estas mediciones luego deben ser comparadas con los límites permisibles aceptados por la industria y la capacidad indicada por la curva característica del ventilador¹⁰.

Es importante recalcar que uno de los efectos de una inadecuada instalación es la caída de la eficiencia volumétrica del sistema y el envejecimiento o destrucción prematura de diferentes partes del sistema, lo cual tiene como consecuencias aumento en los costos de operación y mantenimiento. La eficiencia volumétrica depende en gran medida de cómo la presión del ventilador es utilizada para mover el aire y superar las pérdidas por fricción y choque.

5.6.2.14 Instalación adecuada de ventiladores secundarios en minería subterránea. M25.14

Medida de diseño

Medida eléctrica

En minas subterráneas profundas y extensas con elevados requerimientos de caudal de aire, además de ventiladores primarios, es necesario operar ventiladores secundarios en línea con estos últimos. Estos, deben ser acoplados a un muro sólido por medio de un conector flexible y equipado de contrapuestas de seguridad, monitores ambientales, y accesorios mecánicos y eléctricos para ser activados en casos de emergencia. Los ventiladores secundarios, los que pueden ser de tipo axial o centrífugo, son diseñados e instalados para ayudar al ventilador primario caracterizándose por poseer una menor capacidad respecto a estos últimos.

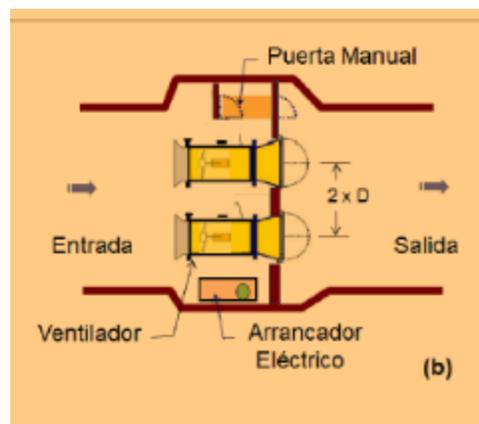
Un ventilador secundario correctamente diseñado e instalado, permite cumplir con los siguientes propósitos: reducir la resistencia efectiva de la mina, facilitar una distribución adecuada de presiones de aire, aumentar la eficiencia del sistema global de ventilación y disminuir el consumo de energía eléctrica. No obstante, para cumplir con dichos objetivos, es necesario que estos ventiladores sean instalados y operados correctamente, de lo contrario, aparte de no poder cumplir con tales propósitos, una mala instalación puede causar una recirculación no controlada de contaminantes. Esto, puede evitarse añadiendo al diseño un sistema de monitores ambientales para detectar condiciones subnormales.

La figura a continuación muestra un esquema de instalación de dos ventiladores secundarios en una mina metálica, en la que la galería de ventilación es también usada para el transporte de personal y materiales, razón por la cual dicha galería se divide en dos: una para el ventilador y la otra para las contra-puertas de ventilación. En esta figura se muestran dos ventiladores en paralelo en una galería y dos puertas en la otra.

¹⁰ Fuente: buenas prácticas en instalación de ventiladores y accesorios de ventilación.



En una mina subterránea, para reducir la recirculación de aire, tanto los ventiladores como las puertas deben ser instaladas en muros de concreto contruidos para resistir altas presiones. Estos, además, deben ser anclados a paredes y equipados con puertas manuales y otros accesorios de seguridad. Concretamente, cuando dos o más ventiladores son instalados en paralelo, cada ventilador debe ser dotado con una compuerta automática (Damper) en su difusor para ser abierta cuando el ventilador está funcionando, y cerrada cuando el ventilador se encuentra apagado. Por otra parte, para un ventilador de diámetro D , la distancia mínima entre los ventiladores es de $2xD$, tal como se muestra en la siguiente figura.



Las contra-puertas, las que pueden estar equipadas con actuadores neumáticos o eléctricos, son utilizadas para alcanzar dos objetivos: 1) permitir un tráfico ordenado de vehículos por las puertas y 2) evitar una recirculación incontrolada de aire. Para el primer punto, se requiere tener un procedimiento bien establecido para operar estas puertas, y así controlar que mientras una de éstas se encuentre abierta, las otras deberán permanecer cerradas. Esta práctica permite también reducir la recirculación y aumentar la eficiencia de los ventiladores. Es importante destacar que una utilización inadecuada de estas puertas puede resultar en accidentes por impacto de consecuencias serias.

Una vez concluida la instalación, cada ventilador debe ser probado para medir rendimiento y por condiciones de seguridad. En la práctica, implica hacer mediciones de factores tanto en el ventilador como en las construcciones. Estos factores son medidos bajo diferentes condiciones de operación, incluyendo operación del ventilador sin carga, con carga parcial y carga total. En una mina, estas condiciones se crean abriendo y cerrando las puertas de control. Respecto a los principales factores a medir, estos son: nivelación y alineación de elementos y partes constructivas, vibración del ventilador, temperaturas del motor y apoyos, y la capacidad del ventilador. Estas mediciones luego deben

ser comparadas con los límites permisibles aceptados por la industria y la capacidad indicada por la curva característica del ventilador¹¹.

5.6.3 Proyectos Implementados

<p>Implementación de una estrategia de control en sistema de compresión de aire</p> <p>Caso: Automatización Aire comprimido.</p> <p>COLLAHUASI</p>	<p>Medida:</p> <p>El aire comprimido operaba de manera manual y con varios equipos simultáneamente, generando más aire comprimido del necesario.</p> <p>Como una medida de eficiencia se decidió automatizar la operación del aire comprimido para una operación más eficiente, disminuyendo el consumo de energía eléctrica considerablemente.</p> <p>Ahorro</p> <p>171.939 KWh/año</p>	<p>Reporte avance del convenio de cooperación entre Ministerio de energía y Consejo minero. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. 2018</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/05/Collahuasi.pdf</p>
<p>Implementación de Software de ventilación on-demand (ventilación inteligente)</p> <p>MINA TOTTEN CANADA</p> <p>(Mina subterránea)</p>	<p>La mina Totten en Canadá ha implementado completamente un software con el sistema ABB 800xA para el control de la ventilación, utilizando variadores de frecuencia en los ventiladores principales de superficie, ventiladores auxiliares de encendido/apagado, reguladores y puertas con control “loops” de flujo de aire PID para generar la distribución del flujo de aire deseado bajo tierra.</p> <p>Ahorro de energía estimado:</p> <p>Alrededor de un 25%</p>	<p>https://www.researchgate.net/publication/311571706_Updated_Ventilation_On_Demand_review_implementation_and_savings_achieved</p>
<p>Almacenamiento de energía térmica estacional</p> <p>Mina Creighton</p> <p>Canadá</p>	<p>En la Mina Creighton (Sudbury, Ontario) en Canadá, la nieve presente durante los meses de invierno puede ser usada para enfriar el flujo de aire durante el verano siguiente. Esto elimina la necesidad de instalar una costosa planta de refrigeración mecánica y bajar los gastos operacionales. Este sistema se conoce como Área Natural de Intercambio de Calor -NHEA, también llamada Almacenamiento de energía térmica estacional -SeTES. Históricamente, la mina Creighton ha funcionado sin el uso de refrigeración mecánica durante más de 100 años. El Área Natural de Intercambio de Calor (NHEA) de la Mina Creighton es parte de un antiguo bloque de cuevas dividido en 4 bloques de zanjas que se utilizaban para extraer el mineral. Actualmente, se utiliza todo el año para estabilizar la temperatura exterior antes de que el flujo de aire entre en el sistema de aire fresco de la mina. Inicialmente, los primeros bloques (5 y 6) se pusieron en funcionamiento para acondicionar el aire para el sistema de ventilación a principios de los años 60; tras el éxito del uso de estos bloques iniciales para enfriar y calentar el aire, el bloque número 2 se añadió en 1982. El bloque número 1 fue entonces añadido al sistema de la NHEA en el 2000. Los cuatro bloques disponibles están ahora en</p>	<p>https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1438720/FULLTEXT01.pdf</p> <p>https://www.researchgate.net/publication/284284999_A_combined_ventilation_and_thermodynamic_model_for_dry_surfaces_to_predict_and_optimize_the_NHEA_cooling_and_heating_capacity_for_Creighton_mine</p>

¹¹ Fuente: buenas prácticas en instalación de ventiladores y accesorios de ventilación.

	<p>funcionamiento y al 100% de su capacidad. Hoy en día la mina Creighton está alcanzando los 2.438 metros de profundidad sin necesidad de utilizar un sistema de refrigeración mecánica. Este sistema utiliza un modelo combinado de ventilación e intercambio de calor, para superficies secas, calibrado con los datos históricos, desarrollado para predecir el intercambio de calor que ocurrirá en la NHEA. Una vez generadas las funciones y parámetros para estimar el intercambio de calor a través de la NHEA, el sistema se optimizó para el uso de la capacidad de refrigeración y calefacción y se comparó con los datos históricos para mostrar las posibles mejoras que podrían lograrse con estrategias de funcionamiento diferentes a las utilizadas en el pasado.</p>	
--	---	--

5.7 Gestión de Energía

5.7.1 Descripción

En consideración a que la energía es un insumo estratégico para la minería, tanto por la magnitud de los requerimientos energéticos en los distintos procesos, como por la incidencia en los costos de operación extractiva y productiva, se hace necesario una correcta gestión de este insumo con el fin de optimizar tanto física como económicamente el uso de energía, empleando soluciones de eficiencia energética y energías renovables, procurando de este modo contribuir a la mitigación de los efectos del cambio climático tan críticos en las actualidad.

El concepto de gestión de la energía nace a partir de la constatación de que muchas iniciativas de eficiencia energética que se implementan de forma aislada, no se perpetúan a lo largo del tiempo. De manera general, los cambios de tecnologías puntuales, sin el debido acompañamiento sistemático de las organizaciones, no genera valor ni consistencia a lo largo del tiempo. Así, los beneficios que resultan de este tipo de iniciativas, como la reducción de costos y emisión de gases de efecto invernadero, demuestran ser puntuales y, muchas veces, efímeros.

En función de esto comenzó a demandarse un mecanismo, que garantizase que los beneficios resultantes de la eficiencia energética fueran percibidos de manera permanente y continua. La aplicación de las disposiciones de la gestión de energía permite que la cultura de la consciencia y el cuidado con relación al uso de la energía sea comprendida y absorbida por todos los miembros de una organización. Además, permite, de forma pragmática, que el monitoreo del uso de la energía se convierta en un componente permanente de las actividades y estrategias de una organización.



La gestión energética en la industria nos permite:

- Reducir los costos y el impacto ambiental, y elevar la competitividad de la producción minera.
- Determinar actividades de monitoreo y control de indicadores de gestión energética a nivel de procesos y empresas.
- Determinar algunas modificaciones factibles a realizar en la estructura de la organización en función de la gestión energética.
- Enfocar la gestión en cambios organizacionales, preparación de los recursos humanos, cambios tecnológicos, mantenimiento de equipos y cambios de los procedimientos operacionales y de gestión.

Finalmente, se presenta un cuadro resumen con las diferencias de una empresa sin y con un sistema de gestión de energía (SGE) implementado.

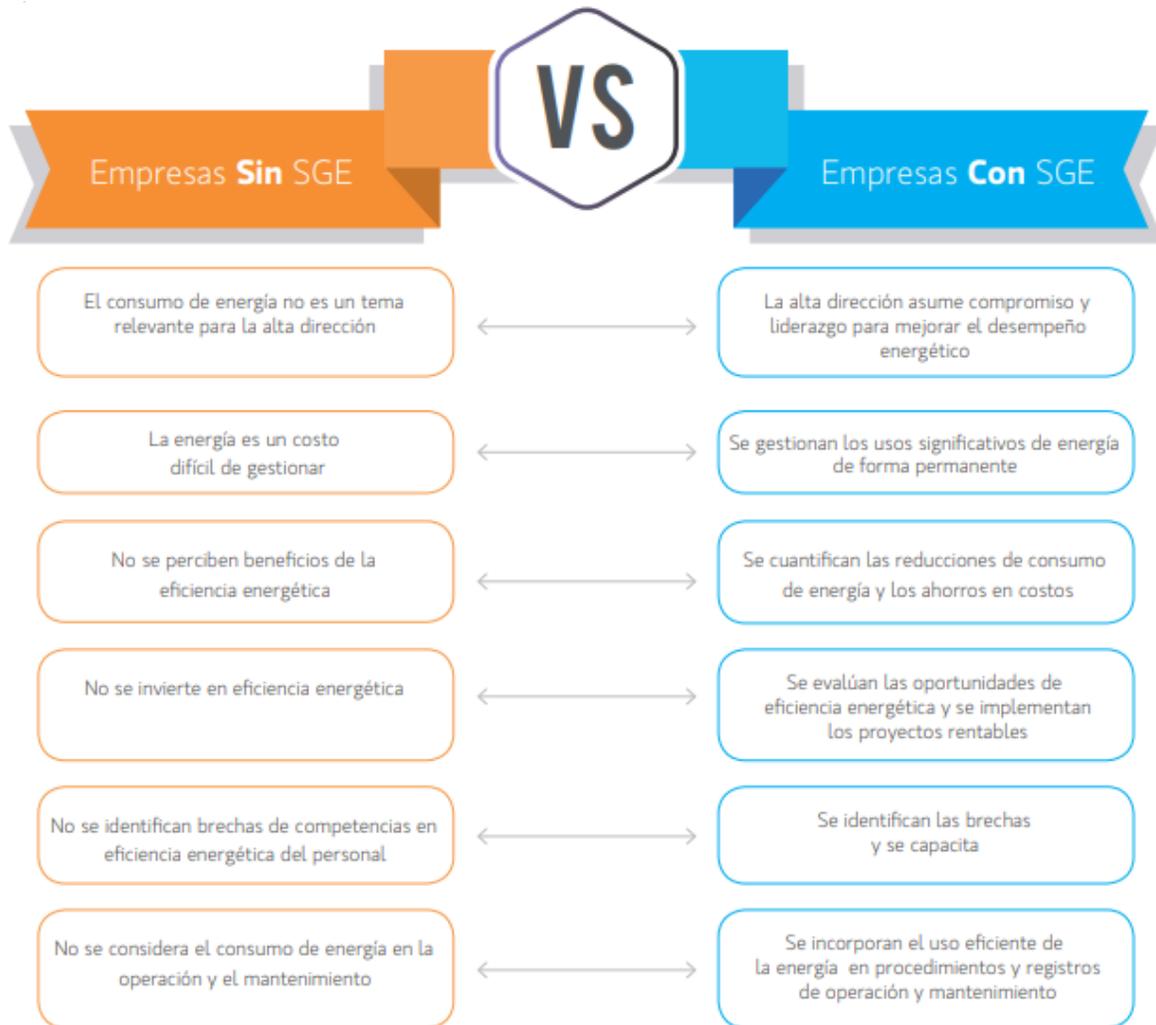


Ilustración 6. Diferencias en una empresa con y sin un SGE implementado. Fuente: Agencia SE 2017, Guía “Beneficios de los Sistemas de Gestión de Energía basados en ISO 50001 y casos de éxito”

Fuente y más información:

https://guiaiso50001.cl/guia/wp-content/uploads/2017/05/Casos_exito_correccion9.pdf

5.7.2 Medidas de Eficiencia Energética

5.7.2.1 Implementación de ISO 50.001. M26.1

Medida operacional

Medida gestión

La norma ISO 50.001 se basa en el modelo ISO de sistemas de gestión. Su uso facilita a las organizaciones, independientemente de su sector de actividad o su tamaño, una herramienta que permite la mejora del desempeño energético, los costos financieros asociados y las emisiones de gases de efecto invernadero.

La implementación de la ISO 50.001 establece un plan energético en la organización de acuerdo a una planificación que establezca acciones concretas y objetivos para mejorar la gestión de la energía y la política energética de la organización, permitiendo alertar a empleados y al nivel ejecutivo y gerencial acerca de las medidas de ganancias de largo plazo en relación al consumo energético, los ahorros que se pueden alcanzar y las ventajas competitivas asociadas.

Esta implementación debe ser monitorizada estableciendo los indicadores adecuados que determinen el grado de cumplimiento de los objetivos y de la planificación establecida, para valorar los resultados.

Es decir, la implementación de esta ISO asegura:

- Cumplir con los requisitos de calidad energética de la ISO 50.001.
- Conocer el estado energético actual del sistema de operación.
- Identificar áreas de oportunidad de mejora en relación con la gestión energética.
- Ahorros energéticos y, por lo tanto, económicos.
- Confianza en el ahorro energético producido de la planta o industria.
- Asegura el funcionamiento de las medidas de eficiencia energética mediante su monitorización.
- Énfasis en la mejora continua de la gestión energética.
- Cumplimiento de leyes nacionales e internacionales de emisiones .

La aplicación de esta norma ha conseguido generar a las organizaciones un ahorro sistemático de entre el 5% y el 30% del costo energético, según un reciente balance realizado por la Organización Internacional de Normalización (ISO).



Figura: Modelo de gestión de la energía según ISO 50001. Fuente: Manual ISO50001 Agencia SE

Más información:

[Manual ISO 50.001 Agencia SE](#)

<https://calidadgestion.wordpress.com/2018/03/01/ahorro-de-costos-de-energia-con-iso-50001/>

<https://chile.corresponsables.com/actualidad/energia/iso-5001-ahorro-energia-30-por-ciento>

<http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/2390pub.pdf>

5.7.2.2 Análítica para la eficiencia energética y Big Data aplicado en minería. M26.2

Medida operacional

Medida eléctrica

Una de las claves para el éxito de la gestión energética es verla como un proceso, no como un proyecto. Las nuevas tecnologías producen cambios operacionales a través de la cadena de valor y su uso no es necesariamente exclusivo para una actividad específica. Se puede hacer un monitoreo y seguimiento del mineral desde la tronadura (para optimizar su procesamiento), con el fin de optimizar el uso de explosivos y uso de energía en molienda SAG. Por ello, se han desarrollado aplicaciones con información en línea para la toma de decisiones integrada del proceso mina-planta, con inferencia de resultados y modelamiento de escenarios posibles. Y se han implementado sistemas de monitoreo y caracterización en tiempo real, así como diseño e instalación de centros integrados de operación para control y operación a distancia.

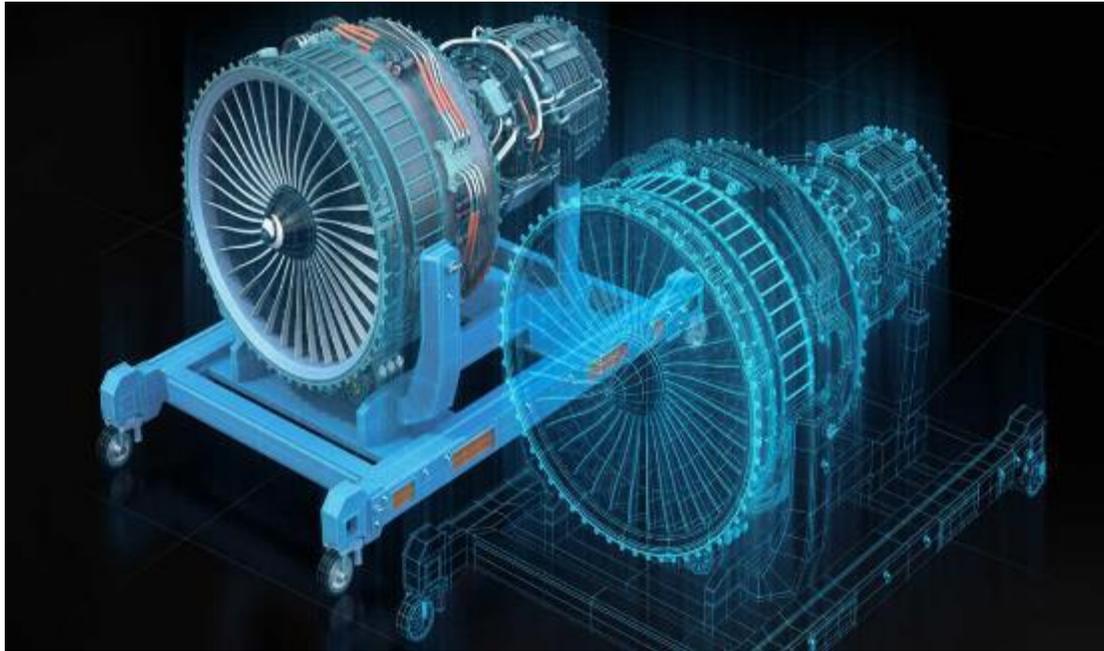
Hacer uso de tecnología inteligente, particularmente técnicas como *Machine Learning* e *Inteligencia Artificial* que permitan procesar volúmenes muy significativos de datos y tomar decisiones. Actualmente en Chile la información que se genera en la exploración debe ser entregada por las empresas mineras. Esto tiene un potencial de descubrimiento mayor al uso de estas técnicas. Implementando modelos de datos históricos para anticipar fallas de sistemas o poder realizar simulaciones numéricas en tiempo real en base a datos monitorizados se permite aumentar la eficiencia de todo un proceso de producción.

La configuración de “gemelos digitales” es una realidad que actualmente opera en la industria con un impresionante grado de avance y aunque aún no está masificada como tecnología, sin embargo, es una poderosa herramienta disponible para la industria. Esta configuración permite obtener verdaderas réplicas digitales de objetos funcionales, equipos, máquinas e instrumentos reales de la industria que pueden ser configurados con la mayor experiencia que la data de la realidad indica en la historia del uso del objeto en la realidad. Esto significa que el objeto sujeto de *IoT* (Internet of Things) puede alimentarse de la Big Data de su experiencia con lo cual con pequeños algoritmos de aprendizaje pueden incluso aprender e interactuar de manera inteligente logrando un avance notable que puede incrementar la productividad industrial hasta en un 25% reduciendo los costos hasta en un 40% para la experiencia del proceso actual y hasta en un 65% para el caso de nuevas experiencias o la aplicación de prototipos de uso industrial y comercial.

Más información en:

<https://www.mch.cl/2020/03/02/tres-pilares-de-csiro-en-tecnologias-para-la-mineria/>

<http://max-schwarz.blogspot.com/2018/10/digital-twins-con-inteligencia.html>



<https://tecnologiaminer.com/index.php/actualidad/la-eficacia-del-gemelo-digital-en-la-mineria-1611115883>

5.7.3 Proyectos Implementados

<p>Control del Factor de Potencia y armónicos</p> <p>Caso: Factor de potencia (FP)</p> <p>TECK RESOURCES CHILE</p>	<p>Medida:</p> <p>Existía un bajo factor de potencia, 0,97. Mayor nivel de pérdidas en media tensión (entre 1 -2 %). Se normaliza uno de los bancos de filtros de armónicos y compensación a través de una puesta a punto y del desarrollo de un sistema de control. Con ello, se normaliza el FP a valores entre 0,99 y 1, mejorando la eficiencia del sistema y reduciendo las pérdidas.</p> <p>Ahorro:</p> <p>Reducción energía: 18,9 [TJ] al año</p> <p>Reducción emisiones gases: 2.193 [tCO2-2] al año</p>	<p>Reporte avance del Convenio de Cooperación entre Ministerio de Energía y Consejo Minero</p> <p>TECK RESOURCES CHILE. 2020</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_Teck2019.pdf</p>
<p>Implementación de ISO 50.001.</p> <p>Caso: Desarrollo e implementación de la ISO 50.001</p> <p>PUERTO PATACHE COLLAHUASI</p>	<p>Medida:</p> <p>Puerto Patache corresponde al emplazamiento de la planta de producción de concentrado de molibdeno, y producción y embarques de concentrado de cobre. En este lugar se realiza el proceso de concentración de Molibdeno, espesado; filtrado; correas de embarque; embarque; servicios de agua y aire. Tiene una potencia instalada total en motores eléctricos de 8 MW aproximadamente (2015). A través de la implementación de un sistema de gestión de energía la evolución del consumo energético en Puerto Patache ha disminuido.</p>	<p>Reporte de sustentabilidad 2017; COLLAHUASI.</p> <p>Tesis de grado:</p> <p>Análisis técnico y económico de proyectos de eficiencia energética en puerto patache de la compañía minera doña Inés de Collahuasi. (2015) Sebastián Andrés Gwinner Silva. Universidad de Chile</p>

	<p>Ahorro: Toneladas métricas secas (Dry Metric Tons).</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2015: 18,72 KWh/DMT • 2016: 17,24 KWh/DMT • 2017: 14,03 KWh/DMT 	<p>Reporte avance del convenio de cooperación entre Ministerio de energía y Consejo minero. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. 2018</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/05/Co-llahuasi.pdf</p>
<p>Indicador divisional de desempeño energético. DIVISIONES DE CODELCO</p>	<p>Medida: Para una mejor gestión energética, se decidió incorporar un indicador de eficiencia energética en los convenios de desempeño divisionales. Estos indicadores son reportados mensualmente a través de los Informes de Gestión Divisionales.</p>	<p>Reporte avance del convenio de cooperación entre Ministerio de Energía y Consejo Minero- CODELCO</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_Codelco2019.pdf</p>

5.8 Transporte de Personas

5.8.1 Descripción

Servicio auxiliar de gran relevancia que permite desplazar a los trabajadores de una mina desde zonas de residencia o desde ciudades de divisiones administrativas u operativas, hacia diferentes puntos de la faena industrial. Este servicio se constituye generalmente de 3 módulos: operador de transporte, suministradores de flotas y soporte tecnológico, considerándose en el primero la operación, mantención y servicios anexos a las flotas de equipos de transporte de personal; en el segundo se consideran las distintas flotas de equipos de transporte de personal; y en el tercero, el soporte tecnológico asociado al control de la flota, control de accesos y elementos de seguridad.

Para estos servicios, la flota puede estar constituida de buses convencionales, buses eléctricos, taxi buses, carry all, furgones, minibuses, entre otros.



Así también, en minería el uso de camionetas para el transporte de personas es extendido. Aunque estos medios de transporte son de gran utilidad para el desplazamiento seguro de una o pocas personas, constituye en una fuente ineficiente de uso de energía si se utilizar comúnmente para el desplazamiento de personas desde los centros poblados hacia los puntos de trabajo.



5.8.2 Medidas de Eficiencia Energética

5.8.2.1 Implementación de transporte eléctrico. M27.1

Medida de diseño

Medida transporte

Consiste en la implementación de sistemas de transporte eléctrico para el transporte de trabajadores. Los vehículos eléctricos que pueden incluirse en la operación de las mineras pueden ser buses para gran cantidad de trabajadores, camionetas híbridas y automóviles eléctricos.

Las empresas mineras movilizan a diario a miles de trabajadores que se dirigen a las distintas faenas y la incorporación de vehículos eléctricos puede contribuir en gran manera a reducir la huella de carbono de sus faenas. La operación de estos vehículos implica una importante reducción en emisiones en la faena, pues su movimiento no emite gases de efecto invernadero.

- Los buses eléctricos no consumen oxígeno al moverse, al contrario de los buses a diésel. Los buses a diésel por lo tanto pueden ver afectada su velocidad y operación a grandes alturas, al reducirse la cantidad de oxígeno disponible en el ambiente, problema que no ocurre con los buses eléctricos.
- Conllevan sistemas de gran seguridad, como cortacorrientes de emergencia y cámaras de 360°.
- Generan menos ruido y vibración al moverse en contraste a los buses a diésel, aumentando la comodidad de los trabajadores y el impacto a las comunidades aledañas.

Se estima que el reemplazo de buses a diésel por buses eléctricos evitaría el consumo de entre 700 y 1.000 litros de petróleo por cada 100 km, equivalente a unas 50.000 toneladas de CO₂.



Figura: Buses eléctricos. Fuente: Revista Minería Chilena

Más información:

<https://www.mch.cl/2019/10/14/mineria-sector-con-mas-buses-electricos-despues-del-transporte-publico/>

<https://www.mch.cl/2020/01/29/los-beneficios-que-estan-entregando-los-buses-electricos-a-la-mineria/>

<https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2019/04/gobierno-impulsa-sistema-de-transporte-electrico-en-faenas-mineras>

5.8.3 Proyectos Implementados

<p>Implementación de plan piloto de sistema integrado de transporte ANGLO AMERICAN</p>	<p>Medida: Anglo American puso en marcha un plan piloto de sistema integrado de transporte eléctrico para trabajadores en sus faenas ubicadas en la Región Metropolitana. Inicialmente, consta de cinco camionetas híbridas, un bus eléctrico que realizará el traslado del personal hacia la planta Las Tórtolas, en la comuna de Colina, y un taxi eléctrico para traslados desde y hacia puntos de retiro del bus.</p>	<p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_Anglo-american2019.pdf Reporte avance Convenio de cooperación entre Ministerio de energía Y consejo minero-Angloamerican. 2020</p>
---	--	--

	<p>Ahorro:</p> <p>300 y 1.000 litros de petróleo por cada 100 km 50.000 toneladas de CO2eq/Año</p>	<p>Pedir autorización uso se foto buscar en web</p>
<p>Proyecto piloto de electromovilidad. CODELCO DIVISIÓN EL TENIENTE</p>	<p>Medida:</p> <p>El transporte de trabajadores entre centros urbanos y las Divisiones tienen alto costo y con la electro-movilidad se presenta la oportunidad para la disminución de este costo, con un uso más eficiente de la energía. El piloto busca evaluar la eficiencia y modelo de negocio para la movilidad eléctrica en los traslados de pasajeros entre centros urbanos y las Divisiones. Para ello se dispuso de un bus entre la ciudad de Rancagua y los Maitenes.</p> <p>Ahorro:</p> <p>300 y 1.000 litros de petróleo por cada 100 km 50.000 toneladas de CO2eq/año</p>	<p>Reporte avance del convenio de Cooperación entre Ministerio de Energía Y Consejo Minero- CODELCO</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_Codelco2019.pdf</p>
<p>Proyecto piloto de electromovilidad. CODELCO MINISTRO HALES, RADOMIRO TOMIC Y GABRIELA MISTRAL</p>	<p>Medida:</p> <p>El transporte de trabajadores entre centros urbanos y las Divisiones tienen alto costo y con la electro-movilidad se presenta la oportunidad para la disminución de este costo, con un uso más eficiente de la energía. Este segundo piloto busca evaluar la eficiencia y modelo de negocio para la movilidad eléctrica en los traslados de pasajeros entre centros urbanos y las Divisiones. Para ello se dispuso de seis vehículos eléctricos que se movilizan entre Calama y las divisiones referidas.</p> <p>Ahorro:</p> <p>300 y 1.000 litros de petróleo por cada 100 km 50.000 toneladas de CO2eq/año</p>	<p>Reporte avance del convenio de Cooperación entre Ministerio de Energía Y Consejo Minero- CODELCO</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_Codelco2019.pdf</p>

5.9 Campamentos Mineros

5.9.1 Descripción

En general, corresponden a sistemas modulares cuyo fin es alojar a los trabajadores que operan en zonas alejadas de asentamientos urbanos. Dichos sistemas, se caracterizan por ser de rápida construcción y montaje, y por ser aptos para instalarse en zonas de difícil acceso y con condiciones climáticas hostiles. De acuerdo a información de Sernageomin, aproximadamente un 80% de los yacimientos mineros reconocidos a nivel internacional se encuentran ubicados en altura por sobre los 3.000 msnm, lo cual se explicaría por el crecimiento sostenido de la minería, y lo que ha provocado la expansión de las faenas a zonas cada vez más altas de la cordillera. En base a ello, es que la metodología modular ha tomado protagonismo en los últimos años tanto por su rápida construcción como por su cumplimiento con diferentes normativas estructurales, sísmicas, térmicas, entre otras, que dan protección al personal de las inclemencias climáticas.

En cuanto a los servicios que brindan, estos corresponden a servicios habitacionales y sanitarios, abasteciendo en algunos casos de calefacción y aire acondicionado.



5.9.2 Caracterización Energética

Los consumos de energía en un campamento minero vienen principalmente de la calefacción de los espacios habitados o el uso de aire acondicionado en períodos de más calor, en especial de oficinas y espacios de uso diurno. Finalmente otro punto importante de consumo en campamentos mineros tiene relación con la producción de Agua Caliente Sanitaria (ACS) para el uso en duchas, cocinas y servicios higiénicos en general.

También otro elemento importante de consumo energético en campamentos tiene relación con la iluminación de sus espacios. Tema que se trata en un proceso específico.

5.9.3 Medidas de Eficiencia Energética

5.9.3.1 Soluciones modulares eficientes. M28.1

Medida de diseño

Medida térmica

Se recomienda considerar la idoneidad de utilizar construcciones armables y desmontables para albergar y satisfacer las necesidades diarias de los trabajadores. Estas construcciones se basan en un sistema de ensamblaje de unidades prefabricadas, que permiten crear desde pequeños espacios arquitectónicos hasta grandes edificios para múltiples usos y aplicaciones, de una manera más versátil, pudiendo ser utilizados para montar habitaciones, oficinas, casinos y otras instalaciones.

Estas soluciones permiten adaptarse a las necesidades propias de cada recinto, manteniendo en consideración el DS 594 que regula las condiciones de habitabilidad de los campamentos mineros.

Las ventajas e innovaciones que se presentan en este campo incluyen:

- Facilidad de transportar.
- Menor requerimiento de mano de obra especializada en terreno para su instalación y transporte.
- Reducción de tiempos y costos de edificación en terreno.
- Incorporación de aislamiento térmico de fibra de vidrio, mejorando incluso las condiciones de algunos edificios de construcción sólida.
- Inclusión de ventanas termopanel.
- Inclusión de soluciones como cubiertas ventiladas y protección contra radiaciones solares.
- Posibilidad de inclusión de paneles solares para el calentamiento de agua para estufas y termos.
- Alta versatilidad, permitiendo incluso la adecuación para ser utilizados como espacios recreativos con un alto estándar de confort.
- Los procesos de fabricación de los edificios se adecúan a procesos, estándares y sistemas de control de calidad propios de una actividad manufacturera, muy distintos a los relacionados con la construcción tradicional



Figura: Campamento en base a sistema modular de construcción. Fuente: Revista Construcción en minería

Más información:

<https://www.construccionminera.cl/tendencias-en-construccion-modular-productividad-y-comodidad/#.YA72fehKgdU>

<https://www.mch.cl/informes-tecnicos/construcciones-modulares-venciendo-condiciones-inhospitas/>

<https://www.mch.cl/informes-tecnicos/construcciones-modulares-en-mineria-uniendo-innovacion-y-versatilidad/>

5.9.3.2 Implementación de equipos eficientes de calefacción en habitaciones de campamentos. M28.2

Medida de diseño

Medida eléctrica

El 47% del consumo de energía en los espacios habitados se gasta en calefacción. Por esta razón, se debe priorizar que los sistemas de generación de calor y agua caliente sanitaria (ACS) sean lo más eficientes posibles, especialmente en zonas con una alta demanda de calefacción.

Para ello, es importante elegir un sistema de calefacción eficiente que no sólo aporte comodidad, confort y ahorro, sino también eficiencia energética.

Bomba de Calor: se trata de uno de los dispositivos más versátiles y eficientes del mercado, ya que los mismos se pueden combinar con sistemas tradicionales o de energía renovable (geotermia o aerotermia). Además, se puede utilizar no sólo para ofrecer calor en nuestros hogares, sino también para producir aire acondicionado en la época estival. Genera hasta un 70% de ahorro en comparación con otros sistemas que emplean electricidad, gas o gasóleo.

- **Calefacción por infrarrojos:** Un sistema de calefacción que es muy particular, ya que el mismo funciona imitando la radiación solar emitiendo ondas de calor infrarrojo. Se trata de un sistema de calefacción que no calienta el aire de forma directa, sino a las personas o seres humanos que se encuentren en las habitaciones, pero también las paredes u otros elementos presentes en las mismas. En lo que se refiere a la eficiencia, es uno de los tipos de calefacción más ecológicos que existe. Sin emisiones de CO₂ y fabricado con un 95% de materiales reciclables. Además de tener una vida útil mayor que cualquier otro tipo de sistema de calefacción.
- **Suelo Radiante:** Es versátil porque la instalación es posible en suelos y paredes. Además, se pueden instalar de manera sencilla tanto en obras de nueva construcción como en reformas. Y es aplicable para cualquier tipo de inmueble. Tiene un buen rendimiento, porque no trabaja a temperaturas muy elevadas como en los sistemas tradicionales. Dando un mejor rendimiento en cualquier tipo de sistema de generación de calor. Además, el suelo radiante es uno de los mejores sistemas para combinarlos con instalaciones térmicas que aprovechan las energías renovables, como la energía solar o la geotermia de baja temperatura.



Más información:

<https://sthexpert.standardhidraulica.com/temperatura-ideal-regula-tu-calefaccion-para-cada-habitacion/>

5.9.4 Proyectos Implementados

<p>Recambio de estufas eléctricas en habitaciones de campamentos, por otras de mayor potencia</p> <p>COLLAHUASI</p>	<p>Medida:</p> <p>Las estufas de las habitaciones actualmente tienen una potencia de entre 1500 a 2000 W, la cual puede ser optimizada. Solución Se compraron 1000 estufas eléctricas eficientes (500 W de potencia) para el recambio paulatino de las estufas antiguas de mayor potencia.</p> <p>Ahorro:</p> <p>700.000 kWh/año</p>	<p>Reporte avance del convenio de Cooperación entre Ministerio de energía y Consejo minero</p> <p>Compañía Minera Doña Inés De Collahuasi Scm. 2018</p> <p>https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/05/Collahuasi.pdf</p>
<p>Construcción Modular Campamento Pérez Caldera</p> <p>Minera Los Bronces</p> <p>ANGLOAMERICAN</p>	<p>En Mina Los Bronces de Anglo American se construyeron ocho edificios modulares de seis pisos, con 36.980 m2. La envolvente perimetral del edificio tiene seis pulgadas de aislante más capas de barreras de vapor, barreras de metal y un revestimiento metálico contra la nieve y agua. Cabe destacar que el Campamento Pérez Caldera fue diseñado con un criterio de ahorro de energía para climatización, usando para ello una envolvente de aislante térmico que garantiza un ahorro en energía para calefacción de más de un 70%.</p> <p>Ahorro estimado</p> <p>70% ahorro en calefacción</p>	<p>Fuente: Revista Minería Chilena</p> <p>https://www.mch.cl/2020/02/03/construccion-modular-el-nuevo-campamento-perez-caldera-de-los-bronces/</p>

6 Bibliografía

- [1 C. Karpuz, «Energy Efficiency of Drilling Operations,» 2017.
]
- [2 «Revista Seguridad Minera,» [En línea]. Available:
] <https://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/perforacion-minera-tipos-clases-de-maquinaria-y-ubicacion-de-taladros/>. [Último acceso: 2020].
- [3 M. Mansouri, «ResearchGate,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Two-AtlasCopco-drilling-machines-Pitviper-351-in-the-process-of-drilling-targets-in-a_fig6_296474523. [Último acceso: 2020].
- [4 «Mining And Construction,» [En línea]. Available:
] <https://miningandconstruction.com/mining/undergroundmining/efficiency-as-strong-as-iron-2607/>. [Último acceso: 2020].
- [5 The Warren Centre, «Zero Emission Copper Mine of the Future,» 2020.
]
- [6 Portal Minero, Manual General de Minería y Metalurgia, 2006.
]
- [7 M. Rojas, «Descripción cuantitativa de los procesos de extracción y reducción de mineral en la minería de cobre a cielo abierto,» 2009.
- [8 A. Aguirre, «Optimización de parámetros de tronadura en función de explosivos de alta energía en sociedad contractual minera El Abra,» Santiago de Chile, 2016.
- [9 «Minería Chilena: Fragmentación y tronadura - Optimización energética de operaciones mineras,» [En línea]. Available: <https://www.mch.cl/informes-tecnicos/fragmentacion-tronadura-optimizacion-energetica-operaciones-mineras/#>. [Último acceso: 2020].
- [1 H. González, «Selección y asignación óptima de equipos de carguío para el cumplimiento de un 0] plan de producción en minería a cielo abierto,» Santiago de Chile, 2017.
- [1 J. Ortiz, «Apuntes de Curso de Explotación de Minas,» Santiago de Chile.
1]
- [1 Sandvik, «Rock Technology,» [En línea]. Available: <https://www.rocktechnology.sandvik/es-2-la/productos/cargadores-y-camiones-subterr%C3%A1neos/equipos-lhd-subterr%C3%A1neos-avanzados/>. [Último acceso: 2020].
- [1 INACAP, «Extracción Mina».
3]

[1 Ferrostaal, «Ferrostaal,» [En línea]. Available: <https://www.ferrostaal.com/es/referencias-4-ferrostaal/locomotora-minera-para-mina-subterranea-de-cobre-de-codelco-chile/>. [Último acceso: 2020].

[1 Chang Ja Kim, «Diseño y evaluación técnico económica de un nuevo sistema de carguío y 5] transporte para la minería de hundimiento,» Santiago de Chile, 2009.

[1 R. Castro, «Sistemas de Extracción Vertical,» Santiago de Chile.
6]

[1 Jack de la Vergne, «Diccionario Técnico de Mineros y Petroleros,» 2012.
7]

[1 T. Masquimillan, «Harneros,» [En línea]. Available:
8] <https://es.slideshare.net/tomasgmp/harneros>. [Último acceso: 2020].

[1 P. Navarro, «Slide Share,» [En línea]. Available:
9] <https://es.slideshare.net/BrunoVillanueva/30712-materialdeestudiopartei-diap180>. [Último acceso: 2020].

[2 Balasubramanian, «Size reduction by crushing methods,» Mysore.
0]

[2 J. Jeswiet y A. Szekeres, «Energy Consumption in Mining Comminution,» Canadá, 2016.
1]

[2 Mackorn, «Mackorn Products,» [En línea]. [Último acceso: 2020].
2]

[2 Rivet, «Catálogo Rivet,» 2006. [En línea].
3]

[2 J. Sandoval, «Mejoramiento Plan de Mantenimiento Área Seca, Chancado Fino, Gerencia de
4] Mantención Cátodos, Minera Escondida Limitada,» Concepción, Chile, 2015.

[2 Salas Hnos Ltda, «Catálogo Ingeniería y Construcciones Salas Hnos Ltda,» Santiago de Chile.
5]

[2 Codelco, «Lixiviación,» Chile, 2019.
6]

[2 Dirección de Estudios y Políticas Públicas, «Construcción de Indicadores de Eficiencia Energética
7] en Minería».

[2 Cochilco, «Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 2000-2019,» 2020.
8]

[2 B. Valenzuela, «Balance Térmico de Soluciones Asociadas al Circuito SX-EW,» 2012.
9]

- [3 «Minería Chilena,» [En línea]. Available: [https://www.mch.cl/reportajes/el-consumo-0\] especifico-de-energia/#](https://www.mch.cl/reportajes/el-consumo-0] especifico-de-energia/#). [Último acceso: 2020].
- [3 R. Sabbagh, «Theoretical and Experimental Investigation of Hydrocyclone Performance and the 1] Influence of Underflow Pumping Effect,» 2015.
- [3 Gaines, Energy and Materials Flow in the Copper Industry, 1980.
2]
- [3 Ministerio de Energía y Minas, «Guía de orientación del uso eficiente de la energía y de 3] diagnóstico energético,» Perú.
- [3 Portal Minero, «Guía de Ingeniería en Operaciones Mineras II,» Portal Minero Ediciones, Chile.
4]
- [3 G. Aravena, «Slide Share,» [En línea]. Available:
5] <https://es.slideshare.net/GabrielAravena/167573358-espesamientoyfiltrado>. [Último acceso: 2020].
- [3 Universidad de Chile, «Separación sólido - líquido,» Santiago de Chile.
6]
- [3 G. Riveros, «Fundamentos de Metalurgia Extractiva,» 2010.
7]
- [3 U.S. Department of Energy, «An assessment of energy requirements in proven and new copper 8] processes,» University of Utah, 1980.
- [3 G. Riveros, «Pirometalurgia,» Universidad de Chile, 2009.
9]
- [4 Comisión Chilena del Cobre, «Tecnología en fundiciones de cobre,» Chile, 2015.
0]
- [4 Metso, «Chancador Giratorio Primario,» [En línea]. Available:
1] <https://www.metso.com/es/productos/chancadores/chancadores-giratorios-primarias/chancador-giratorio-primario-superior/chancador-giratorio-primario-superior-60-110e/>. [Último acceso: 2020].
- [4 McLanahan, «Zarandas Vibratorias,» [En línea]. Available:
2] <https://www.mclanahan.com/es/productos/zarandas-vibratorias>. [Último acceso: 2020].
- [4 Minera Cerro Verde, «Chancado Primario Sociedad Minera Cerro Verde,» [En línea]. Available:
3] <https://i.ytimg.com/vi/w8j1k5eeoNg/maxresdefault.jpg>. [Último acceso: 2020].
- [4 SPD, «Minera Tres Valles recibe fondo de Anglo American para impulsar proyectos,» [En línea].
4] Available: <https://southpacificdrilling.com/minera-tres-valles-recibe-fondos-de-anglo-american-para-impulsar-proyectos/>. [Último acceso: 2020].

- [4 Minería Chilena, «Características de plantas SX pequeñas y medianas,» [En línea]. Available: 5] <https://www.mch.cl/reportajes/caracteristicas-de-plantas-sx-pequenas-y-medianas/#>. [Último acceso: 2020].
- [4 Camiper, «Metalurgia: ¿Qué es la electroobtención y para qué sirve?,» 2019. [En línea]. 6] Available: <https://camiper.com/tiempominero/wp-content/uploads/2019/10/metalurgia-electroobtencion.jpg>. [Último acceso: 2020].
- [4 Rumbo Minero, «Chancado y Molienda en minería: Paso previo hacia el material fino,» [En 7] línea]. Available: <https://www.rumbominero.com/revista/informes/chancado-y-molienda-en-mineria-paso-previo-hacia-el-material-fino/>. [Último acceso: 2020].
- [4 Minería Chilena, «Sensores de vanguardia para optimizar la flotación de concentrados,» [En 8] línea]. Available: <https://www.mch.cl/reportajes/highservice-sensoflot-sensores-vanguardia-optimizar-la-flotacion-concentrados/>. [Último acceso: 2020].
- [4 Federación Minera, «Antofagasta Minerals definiría sus inversiones el 2017,» [En línea]. 9] Available: <http://www.federacionminera.cl/antofagasta-minerals-definiria-sus-inversiones-el-2017/>. [Último acceso: 2020].
- [5 Metso, «Horno térmico Grate Kiln Indurating Machine,» [En línea]. Available: 0] <https://www.directindustry.es/prod/metso-corporation/product-9344-1294367.html>. [Último acceso: 2020].
- [5 Britannica, «Roasting, smelting, and converting,» [En línea]. Available: 1] <https://www.britannica.com/technology/copper-processing/Roasting-smelting-and-converting>. [Último acceso: 2020].
- [5 Consejo Minero, «Buenas Prácticas: Tostación en lecho fluidizado,» [En línea]. Available: 2] <https://i.ytimg.com/vi/8LCdB8sYqOg/maxresdefault.jpg>. [Último acceso: 2020].
- [5 Minería Chilena, «Fundiciones de cobre en Chile,» [En línea]. Available: https://www.mch.cl/wp-content/uploads/2018/10/Foto1_Caletones.jpg. [Último acceso: 2020]. 3]
- [5 Nueva Minería y Energía, «Fundición de Concentrados de Chuquicamata lleva adelante cinco 4] proyectos de mejora,» [En línea]. Available: <https://www.nuevamineria.com/revista/fundicion-de-concentrados-de-chuquicamata-lleva-adelante-cinco-proyectos-de-mejora/>. [Último acceso: 2020].
- [5 Minería Chilena, «Innovación permite reducir generación de scrap durante la electrorrefinación,» 5] [En línea]. Available: <https://www.mch.cl/wp-content/uploads/2014/05/earless-1-ok-620x403.jpg>. [Último acceso: 2020].
- [5 Singh, «New trends in drilling and blasting technology,» *International Journal of Surface Mining, 6] Reclamation and Environment*, pp. 305-315, 2000.
- [5 Babaei Khorzoughi Mohammad y Hall Robert, «Processing of measurement while drilling data 7] for rock mass,» *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016.

- [5 G. N. Moraga Hidalgo, «Características geológicas y geotécnicas generales que intervienen en la 8] tronadura y el efecto de daño en el campo lejano en minería de rajo abierto,» Concepción, Chile, 2018.
- [5 Ingeopres, «Perforación y Voladuras,» España, 2011.
9]
- [6 J. Bernaola, J. Castilla y J. Herrera, «Perforación y voladura de rocas en minería,» Departamento 0] de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas, Madrid, 2013.
- [6 Greg Adel, Toni Kojovic y Darren Thornton, «Mine-to-Mill Optimization of Aggregate 1] Production,» 2006.
- [6 J.B. Segui y M. Higgings, «Blast design using measurement while drilling parameters,» *Fragblast: 2] International Journal for Blasting and Fragmentation*, pp. 287-299, 2002.
- [6 Lei Ge, Long Quan, Xiaogang Zhang, Zhixin Dong y Jing Yang, «Power matching and energy 3] efficiency improvement of hydraulic excavator driven with speed and displacement variable power source,» *Chinese journal of mechanical engineering*, 2019.
- [6 Kwame Awuah-Offei, «Energy efficiency in mining: a review with emphasis on the role of 4] operators in loading and hauling operations,» USA, 2016.
- [6 G. Rojas, «Introducción de un LHD híbrido a la industria minera y sus posibilidades en el mercado 5] chileno,» Santiago de Chile, 2017.
- [6 R. Solorzano, «Caterpillar impacta con su excavadora híbrida,» 2016. [En línea]. Available: 6] <https://www.hydraulicspneumatics.com/hp-en-espanol/article/21886621/caterpillar-impacta-con-su-excavadora-hbrida#:~:text=La%20tecnolog%C3%ADa%20h%C3%ADbrida%20es%20sin%C3%B3nimo,combusti%C3%B3n%20suplementado%20por%20potencia%20el%C3%A9ctrica.&text=Aug%20>
- [6 «Revista Maquinaria Pesada,» 2013. [En línea]. Available: 7] <http://revistamakinariapesada.com/caterpillar-entrego-su-primera-excavadora-hibrida-en-bauma-2013/>. [Último acceso: 2020].
- [6 E. Cornejo, «Sistema de optimización de transporte para la mediana minería,» Chile, 2013.
8]
- [6 A. Moradi Afrapoli y H. Askari-Nasab, «Mining fleet management systems: a review of models 9] and algorithms,» *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2017.
- [7 Minería Chilena, «El caso de Trolley Assist,» 2012. [En línea]. Available: 0] <https://www.mch.cl/reportajes/el-caso-de-trolley-assist/>.
- [7 Minería Chilena, 2015. [En línea]. Available: [https://www.mch.cl/2015/05/25/truck-trolley-un-1\] aliado-en-el-ahorro-seguridad-y-sustentabilidad-de-las-faenas/#](https://www.mch.cl/2015/05/25/truck-trolley-un-1] aliado-en-el-ahorro-seguridad-y-sustentabilidad-de-las-faenas/#).

[7 Mikhailov, «A potencial application of in-pit crushing-conveying and dewatering system in peat 2] mining,» 2019.

[7 Mohammad Reza Tavakoli Mohammadi, Seyed Ahmad Hashemi y Seyed Farhad Moosakazemi, 3] «Review of the in-pit crushing and conveying (IPCC) system and its case study in copper industry,» 2011.

[7 M. Nehring y P. Knights, «A comparison of strategic mine planning approaches for in-pit crushing 4] and conveying, and truck/shovel systems,» 2017.

[7 J. Tonge, «The implications of improved conveyor technology on In-Pit Crusher Conveyor 5] Systems,» 2017.

[7 W. Loli Morales, «Metodología de planificación a cielo abierto considerando incorporación de 6] un pit crusher and conveyors,» Santiago de Chile, 2016.

[7 K. Shah, «Construction, Working and Maintance of Crusher for Crushing Bulk Materials,» 2018. 7]

[7 M. Moncada Merino, «Modelación dinámica no lineal de harnero vibratorio de harnero 8] vibratorio considerando inercia del mineral y fuerza del mineral sobre el harnero calculada con elementos discretos,» Concepción, 2017.

[7 D. Escobar Moscoso, «Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero 9] vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos,» 2016.

[8 J. Saavedra Vidal, «Control de presión de agua mediante variador de frecuencia y motobomba,» 0] 2007.

[8 Electro Industria, 2017. [En línea]. Available: 1] <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=3000&ni=principio-de-funcionamiento-y-ventajas-de-los-vdf>. [Último acceso: 2020].

[8 Vibra Screener, 2016. [En línea]. Available: [https://vibrascreener.com/4-ways-to-improve-the-2\] efficiency-of-your-vibratory-screener-separators-and-sieves/](https://vibrascreener.com/4-ways-to-improve-the-2] efficiency-of-your-vibratory-screener-separators-and-sieves/).

[8 Minería Chilena, 2015. [En línea]. Available: [https://www.mch.cl/reportajes/smg-ingenieria-3\] innovador-sistema-de-riego-para-biolixiviacion-en-pilas/](https://www.mch.cl/reportajes/smg-ingenieria-3] innovador-sistema-de-riego-para-biolixiviacion-en-pilas/).

[8 M. Acuña Reyes y A. Arancibia Reyes, «Patentscope,» 2013. [En línea]. Available: 4] <https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=WO2013049953>.

[8 Minería Chilena, «Innovador proyecto permite a Radomiro Tomic ahorrar hasta 80% en uso de 5] agua,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.mch.cl/2018/07/17/innovador-proyecto-permite-a-radomiro-tomic-ahorrar-hasta-80-en-uso-de-agua/>.

[8 Expande, «Casos de innovación de proveedores en la minería chilena,» 2018. 6]

[8 Fenercom, «Guía de buenas prácticas en el aislamiento industrial,» 2017.
7]

[8 USAID, «Guía de buenas prácticas en eficiencia energética para sistemas de vapor,» 2011.
8]

[8 Agencia de Sostenibilidad Energética, «Guía para calificación de consultores en Eficiencia
9] Energética,» 2011.