



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

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROYECTOS DE EFICIENCIA
ENERGÉTICA EN ELECTRO OBTENCIÓN**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN GESTIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS

ALFONSO DOMINGO BUSTOS ERWENNE

PROFESOR GUÍA:
LUIS ZAVIEZO SCHWARTZMAN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LORETO BURGOS RODRÍGUEZ
JACQUES CLERC PARADA

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA TESIS TESIS PARA OPTAR AL
GRADO DE: Magister en Gestión y Dirección de
Empresas
POR: Alfonso Domingo Bustos Erwenne
Fecha 2022
PROFESOR GUIA: Luis Zaviezo Shwartzman

ANALISIS COMPARATIVO DE PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN ELECTRO OBTENCIÓN

La industria minera del cobre enfrenta el desafío de continuar con su modelo productivo LIX-SX-EW en medio de un escenario de mayores costos de producción por la disminución en la ley de sus recursos, es por esto que la Compañía Minera analizada tiene la intención de desarrollar iniciativas de inversión en eficiencia energética que le permitan la disminución de los costos y riesgos que trae consigo el abastecimiento eléctrico y de hidrocarburos.

La creciente necesidad a nivel nacional de optimizar el uso de la energía realizando inversiones tendientes a actualizar equipos y mejorar el control en la operación para reducir la demanda de recursos naturales sustentan el análisis realizado en este estudio, que tiene como objetivo principal establecer un plan de ahorro energético en el proceso de electro obtención, mediante el análisis de medición y verificación de las medidas de eficiencia energética (MEE) aplicadas a tres proyectos desarrollados por la compañía. Las medidas de eficiencia energéticas fueron agrupadas en Mejoras Operacionales, Recambios tecnológicos y Cambio cultural.

Como base de este estudio se utiliza La Guía Medición y Verificación en la Gestión de Proyectos de Eficiencia Energética – Minería, de la Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE) del año 2015. Esta guía presenta una metodología de cómo se aborda el desafío de establecer un mecanismo apropiado de Medición y Verificación para un Medida de Eficiencia Energética (MEE) aplicable a la Minería.

Del resultado obtenido del estudio realizado a los proyectos de eficiencia energética analizados, se puede observar que para poder establecer una base comparativa entre proyectos de eficiencia energética primero debemos contar con un protocolo que permita evaluar económicamente los proyectos sobre una base común, en este estudio se utilizó el protocolo internacional IPMVP para estandarizar y cuantificar el ahorro energético y por lo tanto el impacto económico de los proyectos de eficiencia energética.

Al implementar los tres proyectos el potencial de ahorro energético es del 11.9% de energía eléctrica y 92.8% de diésel, lo que equivale a un potencial económico de MUSD 21.4. Los proyectos que buscan actualizar, automatizar o maximizar la eficiencia de los equipos y de la operación del proceso de calefacción de electrolito, representan el mayor potencial de ahorro energético y el mayor retorno económico de las inversiones realizadas en adquisición de equipos e implementación de estos, en el caso particular del proyecto analizado (Proyecto A) representó un ahorro energético del 92.8% en el consumo de diésel, con un retorno sobre la inversión del 26.6% que es en sí mismo un resultado extraordinario.

En síntesis, un plan de implementación de proyectos de eficiencia energética en EO debe enfocarse primero en las MEE que buscan hacer más eficiente el consumo de diésel, luego las MEE que permitan controlar la concentración de hierro y, por último y no menos importante, buscar mejorar el contacto de los electrodos en las celdas.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1	Introducción	1
1.1.	Antecedentes generales	1
1.2.	Objetivos	3
	Objetivos Generales	3
	Objetivos Específicos	3
1.3.	Metodología	4
Capítulo 2	Marco Conceptual	5
2.1	Medición y Verificación en la Gestión de Proyectos de Eficiencia Energética	5
2.2	Indicador de rentabilidad para un proyecto de EE	9
Capítulo 3	Proyectos de Eficiencia Energética	9
3.1	Proyecto A: Optimización Sistema de Calefacción de Electrolito	9
	Oportunidades de Ahorro Energético	10
	Planificación del Proceso de Medición y Verificación	11
	Implementación de las Medidas de Eficiencia Energética	12
	Control Automático, Aislación e Instrumentación	12
	Obtención de Datos del Período Demostrativo de Ahorro	15
	Cálculo de la Reducción en el consumo energético	17
3.2	Proyecto B: Nuevo Sistema de Capping board en EO	18
	Planificación del Proceso de Medición y Verificación	18
	Implementación de las Medidas de Eficiencia Energética	19
	Obtención de Datos del Período Demostrativo de Ahorro	20
	Cálculo de la Reducción en el consumo energético	21
3.3	Proyecto C: Control de concentración de hierro para mejorar eficiencia eléctrica en EO	22
	Oportunidades de Ahorro Energético	22
	Planificación del Proceso de Medición y Verificación	22
	Obtención de Datos del Período Demostrativo de Ahorro	23
	Implementación de las Medidas de Eficiencia Energética	23
	Obtención de Datos del Período Demostrativo de Ahorro	24
	Cálculo de la Reducción en el consumo energético	24
Capítulo 4	Análisis Económico	25
4.1.	Datos	25
4.2.	Resultados de la Implementación de las MEE	25
Capítulo 5	Conclusiones	27
Capítulo 6	Bibliografía	28

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Datos de consumo de Diésel y producción de cobre mensual durante el período de referencia	12
Tabla 2 Datos de temperatura entrada electrolito EO durante el período de referencia.....	12
Tabla 3 Datos de consumo de Diésel y producción de cobre mensual durante el período de demostrativo de ahorro	16
Tabla 4 Datos de temperatura electrolito Alimentación celdas EO durante el período de demostrativo de ahorro	17
Tabla 5 Datos diferencia de voltaje par ánodo – cátodo durante el período de referencia.	19
Tabla 6 Datos de Corriente aplicada en Banco 4 durante el período de referencia	19
Tabla 7 Datos diferencia de voltaje par ánodo – cátodo durante el período de demostrativo de ahorro	21
Tabla 8 Datos de Corriente aplicada en Banco 4 durante el período de demostrativo de ahorro	21
Tabla 9 Reducción de consumo energético.....	22
Tabla 10 Datos de consumo de Concentración de hierro, energía mensual consumida en EO y producción de cobre mensual durante el período de referencia	23
Tabla 11 Datos de Concentración de cobre en solución de PLS el período de referencia.....	23
Figura 19 Evolución de concentración de Fe al realizar descarte de electrolito controlado.....	23
Tabla 12 Datos de consumo de Concentración de hierro, energía mensual consumida en EO y producción de cobre mensual durante el período de referencia	24
Tabla 13 Datos de Concentración de cobre en solución de PLS el período de referencia.....	24
Tabla 14 Tabla 9 Reducción de consumo energético	24
Tabla 15 Resumen Características Económicas de cada Proyecto.....	25
Tabla 16 Resumen Determinación ROI de cada Proyecto	25

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Consumo energético y producción cuprífera 2001-2020. Reproducción Propia. Fuente Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2020, Cochilco, 2020	1
Figura 2. Participación en consumo de energía por proceso al 2020. Reproducción Propia. Fuente Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2020, Cochilco, 2020	2
Figura 3. Intensidad Energética por área de proceso. Reproducción Propia. Fuente Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2020, Cochilco, 2020	2
Figura 4 Esquema general del proceso de Medición y Verificación. Reproducción Propia. Fuente Medición y Verificación en la Gestión de Proyectos de Eficiencia Energética, AChEE, 2020	5
Figura 5 Esquema Principios M&V. Reproducción Propia. Fuente Principles of M&X, evo-world.org	6
Figura 6 Opciones del IPMVP. Reproducción Propia. Fuente Medición y Verificación en la Gestión de Proyectos de Eficiencia Energética, AChEE, 2020	7
Figura 7 Pasos básicos en la medición y Verificación según el IPMVP. Reproducción Propia. Fuente Medición y Verificación en la Gestión de Proyectos de Eficiencia Energética, AChEE, 2020	8
Figura 8 Sala de calentadores SX-EW	10
Figura 9 Reproducción Propia, Circuito cerrado agua caliente	10
Figura 10 Temperatura Electrolito AC	13
Figura 11 Diagrama sistema calefacción electrolito AC, Planta SX-EW.....	13
Figura 12 Líneas de electrolito con deficiente aislación térmica.....	14
Figura 13 Instalación aislación térmica.....	14
Figura 14 Nuevo intercambiado de calor E-E	15
Figura 15 Consumo específico de diésel por tonelada de cobre producida.....	17
Figura 17 Celdas con capping nuevo y antiguo	20
Figura 18 Comparación de DV entre grupos de celdas con capping nuevo y otro con capping antiguo	20

Capítulo 1 Introducción

1.1. Antecedentes generales

El consumo total de energía de la industria minera del cobre el año 2020 fue de 180.249 TJ, esto representa el 14% del consumo agregado del país y de ese total el 53% corresponde a consumo de energía eléctrica y 47% al consumo de combustibles, por otra parte el consumo energético desde 2001 a 2020 ha aumentado un 109% creciendo a una tasa del 4.1 % anual, mientras la producción nacional del cobre tiene un comportamiento más estable, con un aumento del 1.1% anual, La figura 1 muestra el comportamiento del consumo de energía y producción nacional de cobre entre 2001 y 2020.

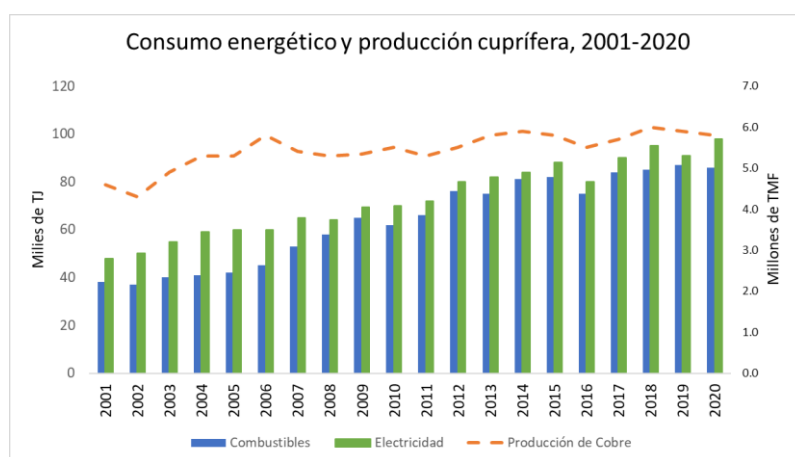


Figura 1. Consumo energético y producción cuprífera 2001-2020. Reproducción Propia. Fuente Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2020, Cochilco, 2020

En la figura 1 podemos ver también que existe un desacople entre la producción de cobre y el consumo energético que se ha ido produciendo en los últimos años, se necesita un mayor consumo energético para prácticamente mantener la producción de cobre, esta situación se puede explicar por tres tendencias que han presionado al alza el consumo:

- La caída progresiva de las leyes de cobre, por envejecimiento de las minas y al incremento en la dureza del mineral.
- Creciente uso de agua de mar, por un aumento en la producción de concentrados, proceso que es intensivo en el uso de agua y restricciones para obtener agua a través de fuentes continentales.
- Enfoque en la producción de concentrados de cobre.

Al analizar el consumo energético por procesos, los tres que presentan un uso más intensivo de la energía son la mina rajo con un 39% del consumo energético total, seguido por la concentración con un 29% y el proceso LIX-SX-EO con un 13% como lo muestra la Figura 2.

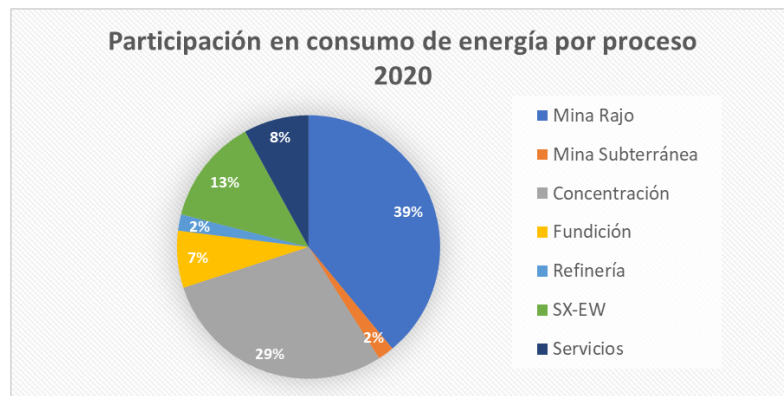


Figura 2. Participación en consumo de energía por proceso al 2020. Reproducción Propia. Fuente Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2020, Cochilco, 2020

Al desglosar el consumo energético diferenciando entre el consumo asociado a electricidad y a combustibles mostrado en la Figura 3, encontramos que el proceso de Electro Obtención (EO) tiene un alto consumo asociado a la intensidad de consumo eléctrico, que por la naturaleza del proceso requiere la utilización de corriente eléctrica continua para realizar la depositación de cobre metálico en forma de cátodos, ésta tiene un peso que oscila entre un 70 y 80% de la energía total del proceso LIX_SX_EO¹

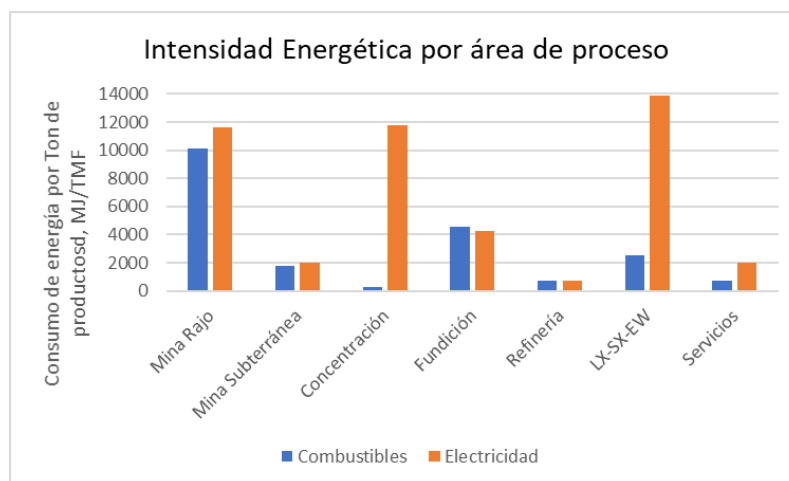


Figura 3. Intensidad Energética por área de proceso. Reproducción Propia. Fuente Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2020, Cochilco, 2020

El consumo de energía por el uso de combustibles está principalmente asociado a los sistemas de calefacción de electrolito que circula entre el proceso de SX y EO, utilizando para esto un circuito de calentadores de agua que operan principalmente en base a diésel.

Por otra parte, el 13 de febrero del 2021, se publicó en el Diario Oficial la Ley N° 21.305 Sobre Eficiencia Energética cuyo objeto es promover el uso racional y eficiente de los recursos energéticos, por cuanto la eficiencia energética es la forma más segura, económica y sustentable de cubrir nuestras necesidades energéticas, las que como hemos revisado han ido aumentando en la industria minera del cobre.

Al aplicarse las medidas contempladas en la ley, al 2030 tendremos una reducción de intensidad energética del 10%, que significa un ahorro acumulado de US\$15.200 millones y una reducción de 28,6 millones Toneladas de CO₂. Esto equivale a evitar

¹, Actualización de información sobre el consumo de energía asociado a la minería del cobre al año 2012. Santiago de Chile: Jorge Zeballos Valenzuela.

el recorrido anual de 15,8 millones de vehículos livianos o a la absorción anual de 1,8 millones de hectáreas de bosque nativo².

En base a este escenario de un uso más intensivo de la energía tanto eléctrica como de combustibles fósiles, la implementación de proyectos que aborden la eficiencia energética en la minería del cobre toma relevancia, para aportar con una mejora en los costos de las compañías mineras en Chile.

Dados estos antecedentes y con la finalidad de cumplir con lineamientos actuales de las compañías mineras referente a la implementación de proyectos que mejoren la eficiencia energética en su operación, es que se hace primordial realizar estudios y análisis de la implementación de proyectos de eficiencia energética, para de esta forma identificar el potencial de ahorro energético presente en el proceso de EO.

Una herramienta importante que facilita el proceso de medir y verificar los ahorros energéticos generados por proyectos de eficiencia energética es el Protocolo Internacional de Medida y Verificación del Ahorro Energético, o IPMVP por su sigla en inglés, que define una estandarización de los procesos de medición y verificación aplicable a todos los tipos de proyectos de eficiencia energética, otorgando sustento internacional a la evaluación de estos proyectos. La medición de los ahorros energéticos permitirá cuantificar el impacto de las medidas de eficiencia energética aplicadas y así determinar el potencial de ahorro presente en EO.

Este trabajo de tesis consistirá en, utilizando las herramientas mencionadas en tres proyectos de eficiencia energética, determinar un potencial de ahorro energético para el proceso de EO. Cuantificando el impacto económico en la operación, de la implementación de proyectos que buscan disminuir el consumo intensivo de energía eléctrica en el proceso de depositación de cobre y consumo de diésel en el circuito de calefacción del electrolito desarrollados por una Compañía Minera en Chile.

1.2. Objetivos

Objetivos Generales

Establecer un plan de ahorro energético en el proceso de electro obtención, mediante el análisis de medición y verificación de las medidas de eficiencia energética (MEE) aplicadas a tres proyectos desarrollados por la compañía, orientados a disminuir el consumo de diésel y electricidad.

Objetivos Específicos

Para dar cumplimiento al objetivo declarado será necesario cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- Determinar los ahorros energéticos de cada proyecto en base a un protocolo internacional.
- Determinar el potencial de ahorro energético de implementar los tres proyectos.

², Ley y Plan de Eficiencia Energética, Ministerio de Energía.

- Analizar las variables de costos de inversión, vida útil de los equipos instalados y ahorro energético para cada uno de los proyectos.
- Determinar el potencial económico de implementar los tres proyectos.
- Establecer una jerarquía en la implementación de proyectos de EE.
- Proponer un plan de ahorro energético asociado al consumo de electricidad y diésel en EO

El presente estudio, determinará el impacto económico que podría tener la puesta en práctica de MEE en procesos de mayor consumo energético en EO, determinado a partir de la implementación de herramientas de medición y verificación de los ahorros energéticos obtenidos por la implementación de dichas MEE.

1.3. Metodología

La metodología a utilizar en este estudio, para dar cumplimiento a los objetivos presentados, será de acuerdo al siguiente esquema:

- Recopilación de antecedentes sobre la implementación de las Medidas de Eficiencia Energética. Inversión, tiempo de ejecución y medición y verificación del ahorro energético logrado luego de implementar las MEE para tres proyectos ya desarrollados, los proyectos son:
 - Proyecto A: Actualización sistema de Calefacción de Electrolito.
 - Proyecto B: Nuevo Sistema de Capping board en EO.
 - Proyecto C: Control de concentración de hierro para mejorar eficiencia eléctrica en EO.
- Análisis de los datos obtenidos para determinar el potencial energético y potencial económico asociado a la implementación de los tres proyectos.
- Establecer una jerarquía en la implementación de los tres proyectos que permita maximizar el beneficio económico para la compañía.
- Finalmente establecer un plan de eficiencia energética de acuerdo con la jerarquía de los proyectos encontrada.

Capítulo 2 Marco Conceptual

2.1 Medición y Verificación en la Gestión de Proyectos de Eficiencia Energética

La guía Medición y Verificación en la Gestión de Proyectos de Eficiencia Energética, realizada por la Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE) plantea la aplicación correcta de Medidas de Eficiencia Energética (MEE), destinadas a optimizar el uso de los requerimientos energéticos utilizados en una organización.

De acuerdo con la naturaleza de las acciones tendientes a lograr ahorros energéticos se pueden distinguir tres tipos de MEE:

Mejoras Operacionales	Recambios Tecnológicos	Cambio Cultural
Gestión de las actividades y optimización de los recursos disponibles	Modernizar un proceso productivo incorporando máquinas o equipos más eficientes.	Adopción de una cultura de utilizar los recursos que corresponden.

Los ahorros energéticos al representar la ausencia de consumos de energía no pueden ser medidos de forma directa, por lo que se determinan comparando el consumo antes y después de la implementación de las MEE y el conjunto de actividades que permite determinar de manera confiable y realizar el seguimiento de los ahorros energéticos se conoce como Medición y Verificación.

La medición y verificación (M&V) es un proceso que requiere de la ejecución de una serie de etapas antes de realizar las mediciones, como se muestra en la Figura 1, la guía mencionada plantea entonces que las mediciones comparables en el tiempo y en condiciones similares son la forma de determinar los resultados reales de una MEE,

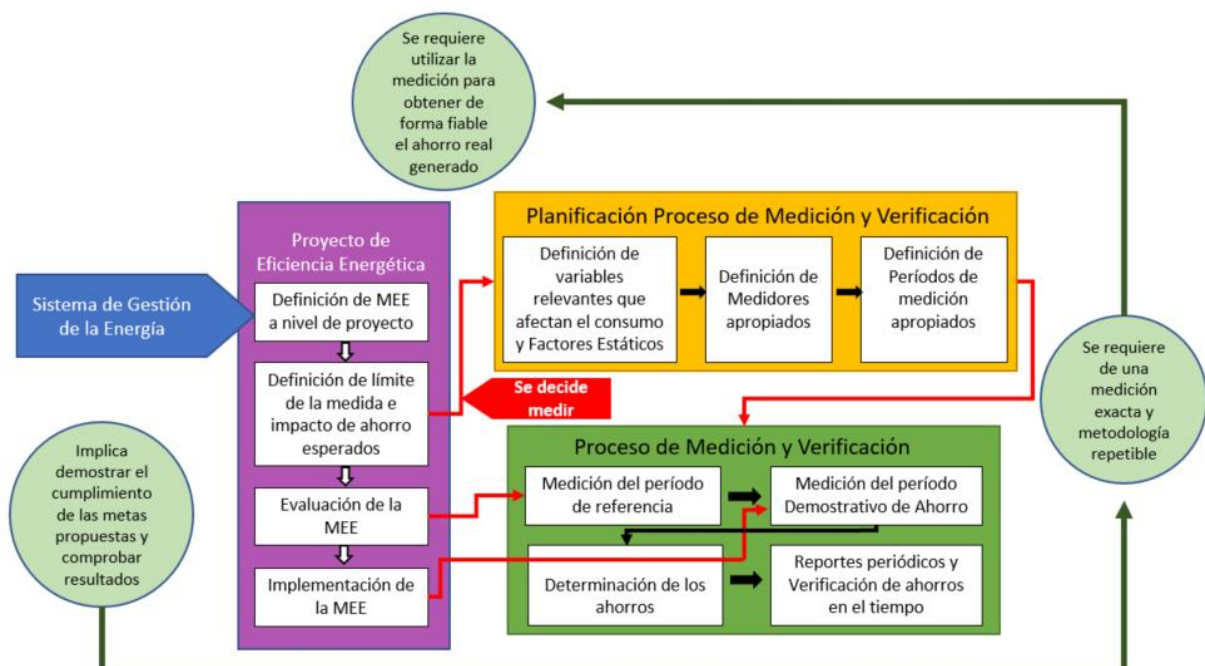


Figura 4 Esquema general del proceso de Medición y Verificación. Reproducción Propia. Fuente Medición y Verificación en la Gestión de Proyectos de Eficiencia Energética, AChEE, 2020

Principios de M&V

Las buenas prácticas de M&V se basan en seis principios fundamentales que se muestran en la Figura 5 y se describen a continuación.



Figura 5 Esquema Principios M&V. Reproducción Propia. Fuente Principles of M&X, evo-world.org

Preciso

Los informes de M&V deben ser tan precisos como lo permita el presupuesto de M&V. Los costos de M&V normalmente deben ser pequeños en relación con el valor monetario de los ahorros que se evalúan. Los gastos de M&V también deben ser consistentes con las implicaciones financieras de la notificación excesiva o insuficiente del desempeño de un proyecto. Las compensaciones de precisión deben ir acompañadas de un mayor conservadurismo en las estimaciones y juicios.

Completo

El informe de ahorros de energía debe considerar todos los efectos de un proyecto. Las actividades de M&V deben usar mediciones para cuantificar los efectos significativos, mientras se estiman todos los demás.

Conservador

Cuando se hacen juicios sobre cantidades inciertas, los procedimientos de M&V deben diseñarse para subestimar los ahorros.

Consistente

"Consistente" no significa "idéntico", ya que se reconoce que cualquier informe derivado empíricamente implica juicios que pueden no ser idénticos para todos los reporteros. Al identificar áreas clave de juicio, IPMVP ayuda a evitar inconsistencias que surgen de la falta de consideración de dimensiones importantes.

El informe de la eficacia energética de un proyecto debe ser coherente entre:

- Diferentes tipos de proyectos de eficiencia energética;
- Diferentes profesionales de la gestión energética para cualquier proyecto;
- Diferentes períodos de tiempo para el mismo proyecto

- Proyectos de eficiencia energética y nuevos proyectos de suministro energético.

Pertinente

La determinación de los ahorros debe medir los parámetros de rendimiento de interés, o los menos conocidos, mientras que se pueden estimar otros parámetros menos críticos o predecibles.

Transparente

Todas las actividades de M&V deben divulgarse de manera clara y completa. La divulgación completa debe incluir la presentación de todos los elementos definidos y un informe de ahorros, respectivamente.

Protocolo Internacional de Medida y Verificación del Ahorro Energético (IPMVP)

Los ahorros de energía no se pueden medir directamente, porque estos representan la ausencia de consumo o demanda de energía.

En cambio, los ahorros se determinan comparando el consumo o la demanda medidos antes y después de la implementación de un programa, haciendo los ajustes adecuados para los cambios en las condiciones. La comparación del consumo o la demanda de energía antes y después debe realizarse de manera coherente, utilizando la siguiente ecuación general de M&V:

$$\text{Ahorros} = (\text{Energía del período de referencia} - \text{Energía del período del informe}) \pm \text{Ajustes}$$

Existen cuatro alternativas para determinar los ahorros energéticos de un proyecto de eficiencia energética que se adecúan a la realidad, objetivos y presupuestos de los proyectos de eficiencia energética y se muestran en la Figura 6.



Figura 6 Opciones del IPMVP. Reproducción Propia. Fuente Medición y Verificación en la Gestión de Proyectos de Eficiencia Energética, AChEE, 2020

Las buenas prácticas requieren que M&V esté bien integrado en el proceso de identificación, desarrollo, adquisición, instalación y operación de medidas de

conservación de energía. El marco de IPMVP requiere que se realicen ciertas actividades en puntos clave de este proceso y describe otras actividades importantes que deben incluirse como parte de las buenas prácticas de M&V.

Los pasos básicos en la medición y verificación de un proyecto de eficiencia energética según los lineamientos del Protocolo Internacional de Medida y Verificación del Ahorro Energético (IPMVP), desarrollado por la Efficiency Valuation Organization (EVO) se muestran en la Figura 7.

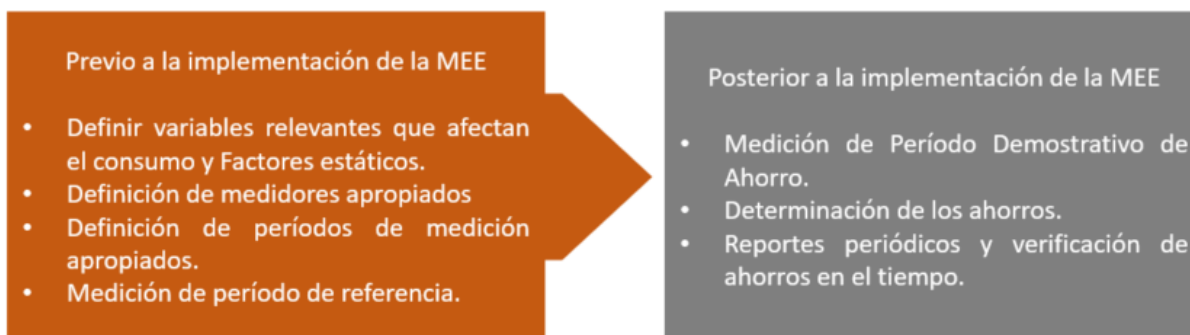


Figura 7 Pasos básicos en la medición y Verificación según el IPMVP. Reproducción Propia. Fuente Medición y Verificación en la Gestión de Proyectos de Eficiencia Energética, AChEE, 2020

Consideraciones específicas antes y después de la implementación de las MEE.

Previo a la implementación:

- Diseñar el proceso de M&V.
- Calibrar si es necesario aparatos de medición.
- Obtener datos del período de referencia.
- Documentar el Plan de M&V.

Posterior a la implementación del proyecto:

- Verificar la correcta implementación de la MEE.
- Obtener datos del período demostrativo de ahorro.
- Calcular ahorros según Plan de M&V.
- Documentar mediante Informes de ahorro.

Los beneficios específicos de aplicar el IPMPVP entre otros son:

- Define criterios estándar para cuantificar la reducción del consumo energético en proyectos de eficiencia energética.
- Permite justificar la inversión financiera por rendimiento
- Ayuda a mejorar la gestión y aumentar la credibilidad de programas referentes al uso de la energía

2.2 Indicador de rentabilidad para un proyecto de EE

Para determinar el impacto económico generado por la implementación de las MEE en los tres proyectos de EE analizados en el presente estudio, se utiliza como indicador el Retorno Sobre la Inversión (ROI).

El ROI es un indicador utilizado para medir el resultado económico generado de las inversiones realizadas, esto es, el porcentaje y nivel de beneficio o pérdida que provoca cada dólar destinado a un proyecto durante un período determinado.

Los principales beneficios de utilizar el ROI son:

- Ofrece el estado de una inversión en tiempo real.
- Ayuda a determinar la rentabilidad de los proyectos.
- Comparar entre proyectos y tomar decisiones en base a datos reales de cada uno de ellos.

El tercer punto es el que será utilizado para determinar la jerarquía de las MEE aplicadas en los proyectos de EE analizados.

La fórmula para calcular el ROI es la diferencia entre el ingreso y la inversión, dividida por la inversión.

$$ROI = \frac{\text{Ingresos} - \text{Inversión}}{\text{Inversión}}$$

Para nuestro estudio vamos a homologar los Ingresos por concepto de una inversión a los Ahorros Energéticos (A^E) obtenidos por la implementación de las MEE a cada uno de los tres proyectos de eficiencia energética analizados, por lo tanto, nuestro indicador rentabilidad para un proyecto de eficiencia energética se determinará de la siguiente manera.

$$ROI = \frac{A^E - \text{Inversión}}{\text{Inversión}}$$

Capítulo 3 Proyectos de Eficiencia Energética

3.1 Proyecto A: Optimización Sistema de Calefacción de Electrolito

La operación del sistema de calentadores de electrolito en la planta de SX-EW para la minera analizada data de 1996, en ese momento se montaron cuatro calentadores calculados para una producción de cobre de 600 ton día, con una alta demanda de energía calórica para mantener la operación de EW.

Desde inicios de las operaciones hasta estos días la ley de cobre soluble ha ido disminuyendo por profundización de la operación en el rajo y esto ha ido impactando en la producción anual de cátodos de cobre, la producción actual bordea las 230 ton día en promedio y existe una utilización de las celdas de EW del 38%, esto ha

modificado los requerimientos de energía para mantener la temperatura de trabajo en un volumen menor de inventario de electrolito lo que no había sido acompañado de una actualización del sistema de calefacción existente.

Oportunidades de Ahorro Energético

La planta originalmente cuenta con 4 calentadores de agua del tipo piro tubular con una capacidad de 6,000,000 kcal/h y cada calentador tiene un consumo medio de 500 litros de diésel por hora.



Figura 8 Sala de calentadores SX-EW

Se cuenta con un circuito cerrado de agua caliente, con cuatro calentadores que operan de acuerdo con la temperatura del electrolito de EO, el agua caliente pasa por un intercambiador de calor para ajustar la temperatura del electrolito de Electro Obtención y mantener su temperatura estable, como se muestra en la Figura 5.

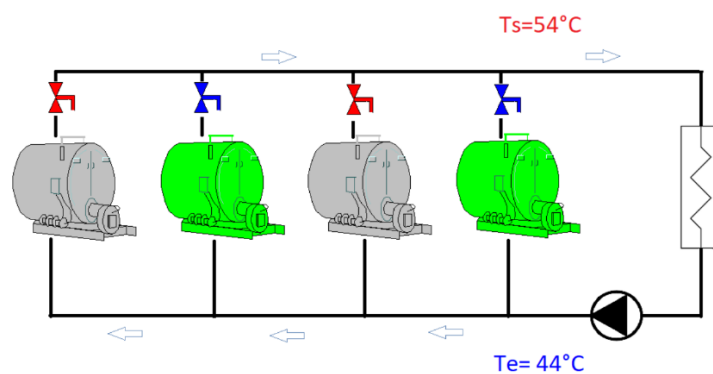


Figura 9 Reproducción Propia, Circuito cerrado agua caliente

El sistema de calefacción también cuenta con dos intercambiadores de calor Electrolito – Electrolito, cuya función es traspasar temperatura del electrolito que proviene desde la Nave de EW (electrolito pobre) hacia el electrolito que ingresa a la Nave de EW (electrolito alimentación celda).

Las oportunidades detectadas en el proceso de calefacción son las siguientes:

1. Se detecta que el control del proceso de encendido/apagado de los calentadores es manual, un técnico pone en servicio y detiene los calentadores directamente en terreno y sin una secuencia determinada.
2. El agua caliente del circuito cerrado ingresaba en los calentadores detenidos actuando éstos como enfriadores dentro del sistema de calefacción.

3. Sólo existe un flujómetro general o integrador para medir el consumo de diésel total de los cuatro calentadores.
4. No existe flujómetro para medir el consumo de diésel para cada uno de los calentadores.
5. Aislación deficiente en ciertos puntos de las líneas de electrolito y agua.
6. Los intercambiadores de calor Electrolito – Electrolito no cuentan con instrumentación adecuada para medir Temperatura, Presión y Flujo en las diferentes entradas y salidas de la solución, dificultando poder evaluar la eficiencia de cada uno de ellos.

Planificación del Proceso de Medición y Verificación

Las Medidas de Eficiencia Energética a implementar en el sistema de calefacción son una combinación de:

- Mejoras Operacionales

Bloqueo de los calentadores que se encontraban detenidos evitando pérdidas de calor en estos equipos.

Implementar una partida y detención remota de los calentadores desde Sala de Control.

- Recambio tecnológico

Instalación de sensores de temperatura en puntos estratégicos. Principalmente en intercambiadores de calor y los calentadores.

Instalación de aislación en los puntos donde falta o es deficiente.

- Cambio cultural.

Evaluar si el diseño de los intercambiadores de calor corresponde con los requerimientos actuales del proceso.

De acuerdo con el Protocolo IPMVP se utiliza la opción C, que determina el ahorro considerando como límite de medida todo el sistema de calefacción de electrolito, que comprende la sala de calentadores, calderas y circuito cerrado de agua más intercambiadores de calor Electrolito - Electrolito.

Como período de referencia se utilizó la data del sistema de calefacción, el consumo de diésel y la producción de cobre durante un año (2018), esto con la finalidad de expresar el consumo de diésel en función de la producción definiendo este valor como Consumo específico de diésel por tonelada de cobre producida y aislar el impacto de la temperatura por las épocas del año en que nos encontramos, la Tabla 4 muestra la obtención de la data durante el año 2018.

	<i>Produccion, ton</i>	<i>Consumo, L</i>	<i>Consumo especifico, L/ton</i>
<i>2018</i>			
<i>Jan</i>	7152.908	689609	96
<i>Feb</i>	7246.857	684551	94
<i>Mar</i>	8159.43	848665	104
<i>Apr</i>	7628.489	877220	115

May	7848.506	895571	114
Jun	7730.996	895114	116
Jul	7724.389	848493	110
Aug	7661.243	871986	114
Sep	7398.857	939259	127
Oct	7592.499	967767	127
Nov	7327.384	783987	107
Dec	7060.737	685905	97

Tabla 1 Datos de consumo de Diésel y producción de cobre mensual durante el período de referencia

Como nuestro plan de Medición y Verificación se basa en el supuesto de que la temperatura del electrolito que ingresa a EO debe permanecer constante por efecto del sistema de calefacción, los datos medidos durante el período de referencia para la temperatura del electrolito al ingresar a la nave de EO, definido como nuestro factor estático se muestran en la Tabla 5.

Row Labels	Temperatura Entrada, °C
2018	37.6
ene	37.4
feb	37.2
mar	38.0
abr	38.0
may	37.8
jun	38.1
jul	37.7
ago	37.5
sept	37.5
oct	37.6
nov	37.6
dic	37.4

Tabla 2 Datos de temperatura entrada electrolito EO durante el período de referencia

Implementación de las Medidas de Eficiencia Energética

Control Automático, Aislación e Instrumentación

La segunda etapa del análisis consiste en actualizar el control de la temperatura, determinar los puntos donde se requería implementar o reemplazar aislación térmica y la instalación de instrumentación necesaria para realizar seguimiento y control de la operación del circuito de calefacción de electrolito.

Primero se necesitaba saber el consumo individual de cada calentador, hasta ese momento solo se tenía un flujómetro general o integrador que entregaba el consumo total y no se sabía cuánto diésel gastaba cada uno de los calentadores.

Este dato es muy importante ya que así se podía saber que calentador era más o menos eficiente por lo que se instalaron flujómetros masicos en cada uno de los calentadores.

Otro de los hallazgos fue que los calentadores tenían una operación manual, es decir, el operador debía ir a prender y apagar los calentadores directamente en terreno. Para mantener las temperaturas del electrolito AC definidas.

Muchas veces el operador no se encontraba en el sector o se encontraba realizando otras labores, por lo que el tiempo de reacción era muy relativo y cada minuto que pasaba era un consumo perdido.

Se comienza a trabajar con personal de control de procesos y se logra implementar una partida y detención remota, con esto los tiempos de reacción disminuyeron, ya que el supervisor de sala de control podía parar o partir los calentadores directamente desde sala.

Posteriormente se implementamos un sistema de control automático, enclavado a la temperatura AC objetivo.

La figura 9 muestra el cambio en la temperatura del electrolito una vez el control automático.

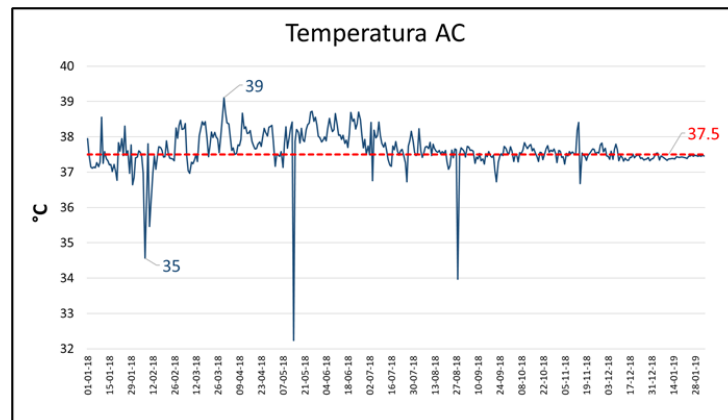


Figura 10 Temperatura Electrolito AC

Se puede observar cómo se logra estabilizar la temperatura AC, manteniendo una temperatura mucho más constante.

Todas las temperaturas sobre el objetivo eran pérdidas innecesarias de combustible y las temperaturas bajas afectan la calidad del cátodo, además de implicar un consumo extra, ya que para retomar la temperatura objetivo se requería de un aporte energético mayor.

La figura 10 muestra el diagrama de proceso, aquí podemos ver la nave EW, los calentadores, SX y los intercambiadores de calor.

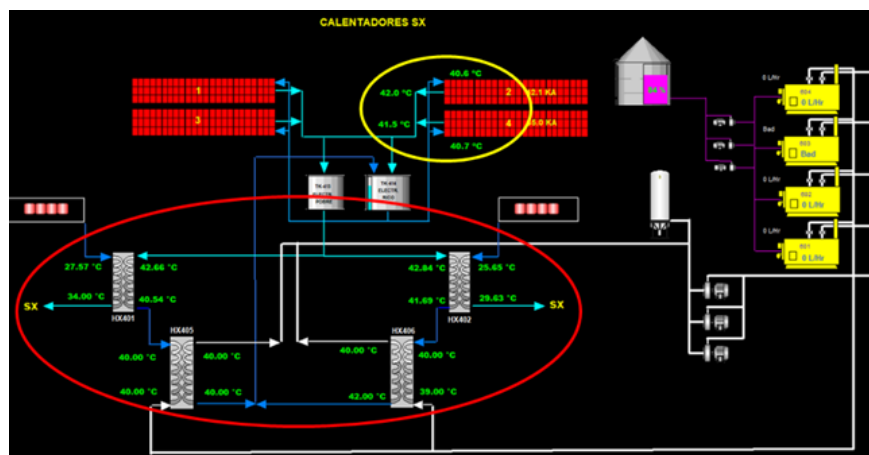


Figura 11 Diagrama sistema calefacción electrolito AC, Planta SX-EW

Originalmente solo se contaba con 4 sensores de temperatura o RTD en línea, instalados en las líneas de electrolito pobre y líneas de AC.

En círculo amarillo podemos ver los únicos 4 RTD que se tenían en el sistema.

Esto era una limitante para poder tomar decisiones operacionales y también impedía identificar otras pérdidas de energía.

Se instalan más de 20 sensores de temperatura en puntos estratégicos. Principalmente en intercambiadores de calor y los calentadores.

En círculo rojo se pueden ver algunos de esos RTD instalados en las entradas y salidas de los intercambiadores de calor.

Con estos datos se pudo identificar que la mala aislación en algunas de las líneas de electrolito y otras de agua eran un factor importante en la pérdida de la eficiencia energética.



Figura 12 Líneas de electrolito con deficiente aislación térmica

Se buscaron alternativas en el mercado y también se evaluaron algunos servicios externos, pero estos tenían un alto costo.

Finalmente se encuentra un tipo de aislación muy práctico que consistía en láminas de PVC y lana mineral.



Figura 13 Instalación aislación térmica

Intercambiadores de calor Electrolito – Electrolito

Con la información recogida por los sensores de temperatura instalados se pudo identificar la baja transferencia que tenían los intercambiadores de calor electrolito rico – electrolito pobre.

Se analizan datos de Temperatura, Presión y Flujo, determinando que la principal causa de esta baja transferencia era una alta saturación y bajo flujo, proponiéndose un nuevo diseño,

Este nuevo diseño:

- Aumentaba el número de placas.
- Aumenta el gap o distancia entre placas, con esto se evita la saturación causada por arrastre de sólidos.
- Por último, se propuso cambiar los ángulos de las placas que privilegiaban un flujo turbulento, ayudando también a disminuir saturación.

Cambiar el diseño original fue una decisión difícil, considerando que estos equipos tienen un alto costo.



Figura 14 Nuevo intercambiador de calor E-E

Obtención de Datos del Período Demostrativo de Ahorro

Tras la implementación de las MME se realiza la recolección de información del período demostrativo de ahorro, como la instalación del segundo intercambiador de calor se realizó en noviembre de 2021 tenemos pocos datos asociados a la totalidad de los resultados obtenidos, pero una gran información de los ahorros energéticos logrados a medida que fueron implementándose cada una de las mejoras.

Los datos obtenidos se presentan en la Tabla 6.

	<i>Produccion, ton</i>	<i>Consumo, L</i>	<i>Consumo específico, L/Ton Cu</i>
2019			
<i>Jan</i>	6352.758	566669	89
<i>Feb</i>	4701.478	456979	97
<i>Mar</i>	6101.715	715674	117
<i>Apr</i>	6703.712	751932	112
<i>May</i>	6452.788	819383	127
<i>Jun</i>	6168.503	723417	117
<i>Jul</i>	6703.73	660206	98
<i>Aug</i>	6892.195	675936	98
<i>Sep</i>	8386.092	649028	77
<i>Oct</i>	8366.361	546909	65

Nov	7432.904	519733	70
Dec	7257.828	508214	70
2020			
Jan	7019.464	460746	66
Feb	5814.554	445703	77
Mar	6203.22	548902	88
Apr	6075.095	537904	89
May	6454.209	585578	91
Jun	5547.644	269504	49
Jul	5235.529	326071	62
Aug	5267.661	354146	67
Sep	5420.126	252478	47
Oct	5748.947	323263	56
Nov	6096.22	145864	24
Dec	7016.393	21	0
2021			
Jan	6745.942	14	0
Feb	5893.288	0	0
Mar	6608.769	0	0
Apr	6061.139	0	0
May	5863.503	3874	1
Jun	5435.99	84460	16
Jul	5504.489	125920	23
Aug	5591.538	139419	25
Sep	4474.832	84353	19
Oct	4990.476	31665	6

Tabla 3 Datos de consumo de Diésel y producción de cobre mensual durante el período de demostrativo de ahorro

La información que corresponde a los factores estáticos, para asegurar que éstos son constantes se muestra en la Tabla 7.

Row Labels	Temperatura Entrada, °C
2019	37.4
ene	37.4
feb	37.4
mar	37.4
abr	37.4
may	37.5
jun	37.4
jul	37.4
ago	37.4
sept	37.4
oct	37.5
nov	37.4
dic	37.4
2020	37.6
ene	37.3
feb	37.3
mar	37.3
abr	37.1

may	36.8
jun	37.8
jul	38.3
ago	37.0
sept	36.9
oct	36.9
nov	38.5
dic	40.0
2021	39.1
ene	40.1
feb	39.2
mar	40.0
abr	38.9
may	38.1
jun	37.7
jul	38.3
ago	39.3
sept	39.6
oct	39.1
nov	40.4

Tabla 4 Datos de temperatura electrolito Alimentación celdas EO durante el período de demostrativo de ahorro

Las temperaturas se mantienen de forma relativamente constante, excepto desde diciembre de 2020, donde luego de realizar la instalación del primer intercambiador se presentó un excedente de temperatura, lo que nos permitió aumentar nuestra temperatura objetivo y además mostrar un menor consumo de diésel.

Cálculo de la Reducción en el consumo energético

Con la validación de los factores estáticos y los consumos específicos de diésel para el período de referencia y el período demostrativo de ahorro, podemos estimar nuestro ahorro energético.

La Figura 15, muestra gráficamente lo ocurrido durante el período 2018 a 2021.

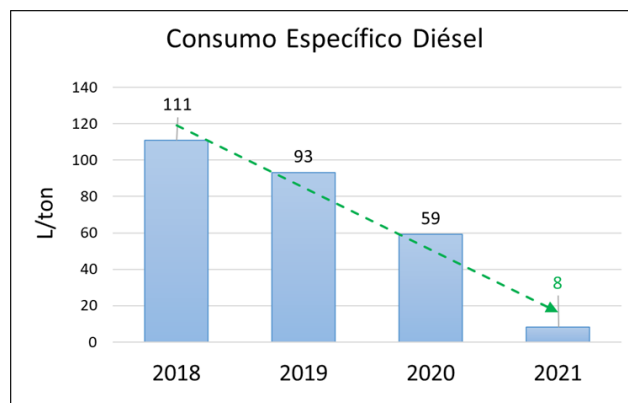


Figura 15 Consumo específico de diésel por tonelada de cobre producida

Desde que se comenzaron a implementar las MEE en el año 2019 comenzó una baja sostenida en el consumo de diésel, además, luego de la instalación del segundo intercambiador de calor a principios de noviembre 2021 el consumo de energía se fue a 0 L/Ton Cu.

Al comparar el período de referencia y el período demostrativo de ahorro tenemos que luego de la implementación de las MEE se logra un 92.8% de ahorro en el consumo energético anual.

Si consideramos que el costo de 1 L de diésel es de 0.57 US\$ y que la producción anual de El Abra es de 90.000 ton por año, el ahorro energético esperado es de 5.3 MM USD/año.

3.2 Proyecto B: Nuevo Sistema de Capping board en EO

La nave de EO de la minera analizada cuenta con cuatro bancos de 170 celdas cada uno, como se mencionó anteriormente la disminución de las leyes ha ido impactando en la producción, razón por la cual el número de celdas operativas actualmente es de 250, es decir para sacar la producción se utiliza el 37% de la capacidad original de las instalaciones.

Oportunidades de Ahorro Energético

Debido a la edad de las instalaciones, que iniciaron sus operaciones en el año 1996, las celdas se fueron desplazando con el tiempo, creando espacios entre las ellas como muestra la Figura 16, generado un efecto negativo en la operación, debido a que dicha separación provoca que los electrodos perdieran el contacto con la barra equipotencial implicando una mala distribución de la corriente al interior de la celda.



Figura 16 Celdas con desplazamiento y contacto deficiente en EO

Planificación del Proceso de Medición y Verificación

La Medida de Eficiencia Energética a implementar corresponde a:

- Recambio tecnológico

Instalar un nuevo sistema de capping board, este sistema tiene una barra más ancha que aumenta el área de contacto, permitiendo una reducción de la resistencia eléctrica y por tanto la disminución del voltaje de la celda debido a una menor resistencia de contacto, esto a una determinada corriente de trabajo en EO, favoreciendo el ahorro de energía por masa de cobre depositado.

De acuerdo con el Protocolo IPMVP se utiliza la opción B, donde el ahorro se determina en un límite de medida menor a la instalación completa, en este caso se utilizan 10 celdas del Banco N°4 de la nave de EO, antes de implementar el nuevo sistema de capping.

Como período de referencia se utilizó la medición de la diferencia de voltaje promedio diario del par ánodo – cátodo para las 10 celdas en un período de 15 días, la Tabla 5 muestra la obtención de la data en mediciones realizadas.

	$\Delta V(\text{promedio por celda}), \text{ Volt}$
1	0.121
2	0.121
3	0.125
4	0.122
5	0.123
6	0.125
7	0.12
8	0.124
9	0.122
10	0.126
11	0.125
12	0.126
13	0.123
14	0.122
15	0.121

Tabla 5 Datos diferencia de voltaje par ánodo – cátodo durante el período de referencia.

Como nuestro plan de M&V se basa en el supuesto de que la corriente de trabajo debe permanecer constante durante el proceso de medición para no alterar los resultados en este caso en 34 kAmp, los datos medidos durante el período de referencia para la corriente de trabajo en Electro Obtención, definido como nuestro factor estático se muestran en la Tabla 6.

	Corriente Bco 4 kAmp
1	34.1
2	34.4
3	34.2
4	34.5
5	34.5
6	34.0
7	34.5
8	34.0
9	34.6
10	34.0
11	34.3
12	34.3
13	34.3
14	34.0
15	34.2

Tabla 6 Datos de Corriente aplicada en Banco 4 durante el período de referencia

Implementación de las Medidas de Eficiencia Energética

La instalación del conjunto capping + barras se realizó en el Banco 4, logrando completar el recambio en el 100% de las 170 celdas operativas.

La Figura 17 muestra dos celdas, una con el capping nuevo y otra con el capping antiguo.



Figura 17 Celdas con capping nuevo y antiguo

Luego de realizar el cambio a un grupo de celdas se pudo verificar la disminución en el potencial correspondiente al contacto de los electrodos y la barra equipotencial, como lo muestra la Figura 18.

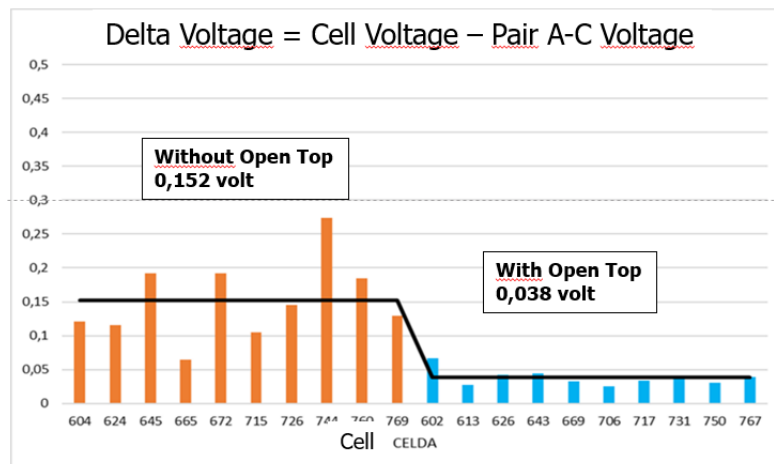


Figura 18 Comparación de DV entre grupos de celdas con capping nuevo y otro con capping antiguo

Obtención de Datos del Período Demostrativo de Ahorro

Tras la implementación de las MME se realiza la recolección de información del período demostrativo de ahorro.

Los datos obtenidos se presentan en la Tabla 7.

	ΔV (promedio por celda), Volt
1	0.034
2	0.032
3	0.033
4	0.033
5	0.033
6	0.033

7	0.034
8	0.034
9	0.033
10	0.033
11	0.034
12	0.034
13	0.033
14	0.033
15	0.032

Tabla 7 Datos diferencia de voltaje par ánodo – cátodo durante el período de demostrativo de ahorro

La información que corresponde a los factores estáticos, para asegurar que éstos son constantes se muestra en la Tabla 8.

	Corriente Bco 4, kAmp
1	34.2
2	34.5
3	34.2
4	34.2
5	34.3
6	34.1
7	34.3
8	34.2
9	34.6
10	34.5
11	34.2
12	34.0
13	34.0
14	34.2
15	34.1

Tabla 8 Datos de Corriente aplicada en Banco 4 durante el período de demostrativo de ahorro

Cálculo de la Reducción en el consumo energético

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 9, donde se puede observar tanto el ahorro energético como el ahorro financiero.

	ΔV (promedio por celda) Volt	ΔV (promedio por celda) Volt	Δ Beneficio	Ahorro por celda MWh/mes	Precio de la energía USD/MWh	Ahorro por menor consumo USD/mes
1	0.121	0.034	0.087	2.197	80	176
2	0.121	0.032	0.089	2.238	80	179
3	0.125	0.033	0.092	2.311	80	185
4	0.122	0.033	0.089	2.243	80	179
5	0.123	0.033	0.090	2.258	80	181
6	0.125	0.033	0.092	2.323	80	186
7	0.12	0.034	0.086	2.167	80	173

8	0.124	0.034	0.090	2.273	80	182
9	0.122	0.033	0.089	2.250	80	180
10	0.126	0.033	0.093	2.334	80	187
11	0.125	0.034	0.091	2.293	80	183
12	0.126	0.034	0.092	2.321	80	186
13	0.123	0.033	0.090	2.273	80	182
14	0.122	0.033	0.089	2.245	80	180
15	0.121	0.032	0.089	2.233	80	179

Tabla 9 Reducción de consumo energético

El ahorro de energía mensual promedio por disminución de pérdidas eléctricas por temperatura o mal contacto de celdas tras la implementación es de 2.26 MWh/celda. Si tomamos como base que el consumo energético anual de EO es 141,000 HMh, el potencial de ahorro energético anual corresponde al 3.3% de la energía eléctrica consumida habitualmente, lo que equivale a un ahorro económico de aproximadamente a US\$369.480.

3.3 Proyecto C: Control de concentración de hierro para mejorar eficiencia eléctrica en EO.

La concentración de hierro en el electrolito de EO tiene un papel preponderante en la eficiencia eléctrica de la depositación de cobre, ya que las reacciones de óxido reducción de los iones Fe+3 y Fe+2 significan un consumo de energía eléctrica que aumenta el requerimiento energético para producir la depositación de cobre metálico en los cátodos, por lo tanto, un electrolito con alta concentración de hierro implica una baja eficiencia de energía eléctrica en EO.

Como las leyes de cobre soluble en el Abra han ido decayendo en el tiempo tenemos que la solución de PLS tiene concentraciones de cobre cada vez más bajas, cuando la concentración de cobre en el PLS baja de 0.8 gpl la selectividad del extractante en SX disminuye “arrastrando” químicamente hierro, aumentando como consecuencia la concentración de éste en el electrolito de EO.

Oportunidades de Ahorro Energético

La medida de control para mantener baja la concentración de hierro es realizar un descarte controlado de electrolito, pero esta medida tiene un efecto económico adverso que es la pérdida de sulfato de cobalto, que es un aditivo agregado al electrolito para aumentar la vida útil de los ánodos de plomo en EO y que tiene un alto costo económico.

Planificación del Proceso de Medición y Verificación

La Medida de Eficiencia Energética a implementar corresponde a:

- Cambio Cultural

Cambiar el paradigma del ahorro de sulfato de cobalto en detrimento de la eficiencia eléctrica de EO, efectuando un programa de descarte controlado para ir disminuyendo en el tiempo la concentración de hierro en el electrolito.

Obtención de Datos del Período Demostrativo de Ahorro

Se utiliza la opción C, que determina el ahorro considerando como límite de medida la operación completa de EO, que comprende el inventario total de electrolito y los bancos de celdas en operación en EO.

Como período de referencia se utilizó la medición de concentración de hierro en el electrolito, consumo energético de EO y Producción de cobre durante los meses de Julio y agosto de 2020, la Tabla 10 muestra la obtención de la data en mediciones realizadas.

	FeT, gpl	Energía E. Nave EW MWh	Producción Ton Cu	Energía específica MWh/Ton Cu
jul-20	2.43	10,964	5,235.529	2.09
ago-20	2.40	10,822	5267.661	2.05

Tabla 10 Datos de consumo de Concentración de hierro, energía mensual consumida en EO y producción de cobre mensual durante el período de referencia

Como nuestro plan de Medición y Verificación se basa en el supuesto de que la concentración de cobre en la solución de PLS determina un mayor o menor requerimiento en el programa de descarte de electrolito para mantener controlada la concentración de FeT, los datos medidos durante el período de referencia para la concentración de cobre en el PLS, definido como nuestro factor estático se muestran en la Tabla 11.

	[Cu]PLS, gpl
jul-20	0.73
ago-20	0.72

Tabla 11 Datos de Concentración de cobre en solución de PLS el período de referencia

Implementación de las Medidas de Eficiencia Energética

La implementación consistió en fijar metas trimestrales cada vez más baja de concentración de hierro en electrolito, logrando pasar de 2.43 gpl en julio 2020 a 1.57 en noviembre.

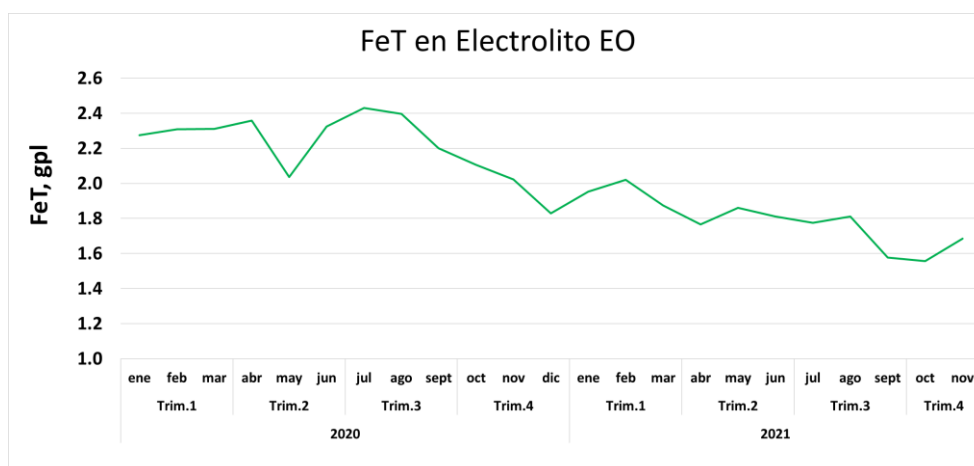


Figura 19 Evolución de concentración de Fe al realizar descarte de electrolito controlado

La disminución de la concentración de hierro en el electrolito se vio reflejada en un incremento sostenido de la eficiencia de corriente, como se puede observar en la Figura 20.

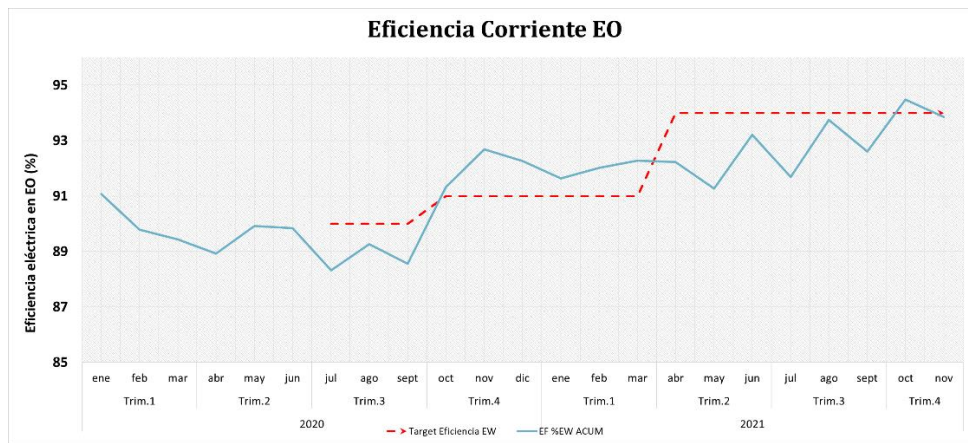


Figura 20 Evolución de la eficiencia de depósito en EW

Obtención de Datos del Período Demostrativo de Ahorro

Tras la implementación de las MME se realiza la recolección de información del período demostrativo de ahorro.

Los datos obtenidos se presentan en la Tabla 12.

	FeT, gpl	Energía Nave EW MWh	Producción Ton Cu	Energía específica MWh/Ton Cu
jul-21	1.78	10,820	5,504.489	1.97
ago-21	1.81	10,650	5,591.538	1.90

Tabla 12 Datos de consumo de Concentración de hierro, energía mensual consumida en EO y producción de cobre mensual durante el período de referencia

La información que corresponde a los factores estáticos, para asegurar que éstos son constantes se muestra en la Tabla 7.

	[Cu]PLS, gpl
jul-21	0.74
ago-21	0.73

Tabla 13 Datos de Concentración de cobre en solución de PLS el período de referencia

Cálculo de la Reducción en el consumo energético

	Energía específica MWh/Ton Cu	Energía específica MWh/Ton Cu	Reducción de consumo MWh/Ton Cu	Precio de la energía USD/MWh	Ahorro por menor consumo USD/Ton Prod
jul-20/21	2.09	1.97	0.12	80	9.6
ago-20/21	2.05	1.90	0.15	80	12

Tabla 14 Tabla 9 Reducción de consumo energético

En promedio el ahorro energético mensual es de 0.135 MWh/Ton Cu, como la producción anual de cobre es de 90.000 Ton, el ahorro energético anual estimado es de un 8.6% lo que equivale a 972.000 USD por año.

Capítulo 4 Análisis Económico

Producto del análisis de la Medición y Verificación de las MEE implementadas en los tres proyectos revisados se espera lograr establecer una jerarquía para los proyectos de eficiencia energética impulsados en EO, lo que se traduciría en un potencial de ahorro energético presente en esta área y que tiene una viabilidad económica que lo respalda.

La evaluación a realizar consiste en la utilización de cada una de las inversiones realizadas durante la implementación de los tres proyectos estudiados, de los cuales se obtendrá el costo total de cada uno de ellos.

Con este valor se calculará el Valor Presente Neto (NPV) de cada proyecto para así obtener cuál sería el potencial beneficio para una Compañía Minera realizar este tipo de proyectos utilizando el Protocolo de M&V.

Con el NPV de cada proyecto se determinará el indicador ROI para cada uno de ellos, para así poder establecer una jerarquía en la implementación de los proyectos analizados y cómo se podría maximizar el beneficio al establecer un orden para implementar los proyectos de EE.

4.1. Datos

Para los tres proyectos en análisis (A, B y C) se cuentan con los costos totales de adquisición de equipos y proceso de implementación. La Tabla 15 nos muestra un resumen de las cantidades, el NPV y la tasa de descuento utilizada para el análisis financiero. Para cada uno de los proyectos se consideró un período de evaluación de 5 años, tiempo estimado de mejor rendimiento de los equipos instalados, principalmente los intercambiadores de calor y el nuevo sistema de capping, con una tasa de descuento del 10% utilizada comúnmente para la evaluación de proyectos en la Compañía.

<i>Proyecto</i>	<i>Equipos USD</i>	<i>Implementación USD</i>	<i>Total Proyecto USD</i>	<i>NPV MUSD</i>	<i>Discount Rate</i>
A	630.000	10.000	640.000	17.7	10%
B	390.000	0	390.000	0.92	10%
C	136.000	0	136.000	2.81	10%

Tabla 15 Resumen Características Económicas de cada Proyecto

Con el NPV de cada proyecto se determina el indicador ROI para cada uno de ellos. La Tabla 16 muestra el resumen de los valores encontrados.

<i>Proyecto</i>	<i>Inversión USD</i>	<i>Retorno MUSD</i>	<i>ROI %</i>
A	640.000	17.7	26.6
B	390.000	0.92	6.81
C	136.000	2.81	19.7

Tabla 16 Resumen Determinación ROI de cada Proyecto

4.2. Resultados de la Implementación de las MEE

Como se pudo determinar en el capítulo 3 y lo obtenido en la Tabla 15, los tres proyectos presentan un ahorro energético importante y se puede determinar que si se implementan en conjunto presentan un potencial de ahorro energético del 11.9% de

energía eléctrica y u 92.8% de diésel, lo que equivale a un potencial económico de MUSD 21.4 en un período de 5 años, lo que significa un ahorro de recursos importante, disminuyendo significativamente los costos por consumo energético de una planta de EO.

También pudimos determinar que aplicar un protocolo de M&V, en nuestro análisis el IPMVP, a las MEE desarrolladas en proyectos de Eficiencia Energética es el camino correcto para poder establecer ahorros comparables y estandarizados. Esto nos permitió realizar una correcta evaluación económica a tres proyectos diferentes entre sí, pero que buscaban generar un ahorro energético.

De la Tabla 16 podemos determinar que, si bien los tres proyectos son rentables económicamente, cada uno presenta una potencialidad diferente. Definitivamente, enfocar los esfuerzos para tener un sistema de calefacción eficiente del electrolito en EO presenta el mayor retorno sobre la inversión realizada, representando la mejor oportunidad de inversión, seguida de un control eficiente y controlado de los descartes de electrolito y finalmente implementar un nuevo sistema de capping board.

Capítulo 5 Conclusiones

Del resultado obtenido del estudio realizado a diferentes proyectos de eficiencia energética desarrollados por la compañía, se puede observar que para poder establecer una base comparativa entre proyectos de eficiencia energética primero debemos contar con un protocolo que permita evaluar económicamente los proyectos sobre una base común. En este estudio se utilizó el protocolo internacional IPMVP para estandarizar y cuantificar el ahorro energético y por lo tanto el impacto económico de los proyectos de eficiencia energética.

Al implementar los tres proyectos el potencial de ahorro energético es del 11.9% de energía eléctrica y 92.8% de diésel, lo que equivale a un potencial económico de MUSD 21.4.

Los proyectos que buscan actualizar, automatizar o maximizar la eficiencia de los equipos y de la operación del proceso de calefacción de electrolito, representan el mayor potencial de ahorro energético y el mayor retorno económico de las inversiones realizadas en adquisición de equipos e implementación de estos, en el caso particular del proyecto analizado (Proyecto A) representó un ahorro energético del 92.8% en el consumo de diésel, con un retorno sobre la inversión del 26.6% que es en si mismo un resultado extraordinario.

En síntesis, un plan de implementación de proyectos de eficiencia energética en EO debe enfocarse primero en las MEE que buscan hacer más eficiente el consumo de diésel, luego las MEE que permitan controlar la concentración de hierro y, por último y no menos importante, buscar mejorar el contacto de los electrodos en las celdas.

También queda de manifiesto que una política de buena gestión de recursos energéticos es un tema relevante para toda la industria, ya que la eficiencia energética trae consigo efectos positivos tanto medioambientales como contención de costos por un uso más razonable de insumos estratégicos como son el combustible diésel y la energía eléctrica, por lo tanto es primordial establecer como un eje central en nuestras operaciones una conciencia de ahorro de energía que nos permita dar sostenibilidad en el tiempo al desarrollo de la minería del cobre.

Capítulo 6 Bibliografía

Referencia 1: Referencia memoria de título 1, Manual de Eficiencia Energética para Minería, Reynaldo Cabezas, 2016.

[Microsoft Word - Proyecto_Titulo_REYN.docx \(uchile.cl\)](#)

Referencia 2: “Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2020”

<https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Informe%20de%20Consumo%20de%20Energ%C3%ADa%202020.pdf>

Referencia 3: Proyección del consumo de energía eléctrica en la minería del cobre 2020-2031.

<https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Proyecci%C3%B3n%20Consumo%20EE%202020-2031.pdf>

Referencia 4: Ley y Plan de Eficiencia Energética.

<https://energia.gob.cl/ley-y-plan-de-eficiencia-energetica>

Referencia 5: Agencia de sostenibilidad Energética

<https://www.energiaenmineria.cl/procesos/electro-obtencion/#medidas>

Referencia 6: Medición y Verificación en la Gestión de Proyectos de Eficiencia Energética.

http://old.acee.cl/sites/default/files/noticias/documentos/MyV_Gu%C3%ADa-Miner%C3%ADa_0.pdf

Referencia 7: Efficiency Valuation Organization, EVO.

<https://evo-world.org/en/products-services-mainmenu-en/protocols/ipmvp>