

PROPUESTA DE MEJORA, SOBRE EL PROCESO DE SECADO DE CONCENTRADO DE COBRE

Trabajo de Titulación para optar al Título
Profesional de Ingeniero de Ejecución en
Gestión Industrial

Alumno: Simón Garay V.

Profesor Guía:

Mg. Ing. Cristian Pávez B.

2025

Índice

Introducción	7
CAPÍTULO 1: Aspectos Generales y Descripción del Problema	8
La Organización	9
Descripción del Problema.....	10
Misión	12
Visión.....	12
Estrategia Organizacional.....	13
Análisis FODA	14
Análisis CAME de la Matriz FODA	16
Descripción del Problema.....	20
Objetivo general y específicos.....	21
Objetivo General	21
Objetivos Específicos	21
CAPÍTULO 2: Identificación del Problema y Oportunidades de Mejora.....	22
Identificación del Problema.....	23
Beneficios al Implementar un Horno de Secado.....	27
Capítulo 3: Solución de Ingeniería.....	36
Alcance del Proyecto.....	37
Objetivos del Proyecto	38
El impacto del proyecto	39
Alcance técnico	39
Diseño de la Solución Propuesta	41
Diseño de la Solución Propuesta	43
Etapas de Implementación	44
Beneficios Esperados.....	45
Selección y Evaluación del Horno Rotatorio Adecuado.....	46
Tabla Comparativa de las Alternativas	48
Selección de la Alternativa más Adecuada.....	48
Cronograma Global	49
Carta Gantt.....	51

CAPÍTULO 4: ESTUDIO ECONÓMICO	52
ANTECEDENTES GENERALES Y SUPUESTOS DEL PROYECTO	53
Antecedentes y Supuestos	53
Supuestos del análisis actualizado:	54
Estructura de Costos.....	54
Costos Iniciales:	54
Costos Operativos Actuales:	55
Costos Operativos Reducidos:.....	55
Comparación de Costos Operativos Actuales y Proyectados	56
Conclusión y Recomendaciones	60
Bibliografía.....	61

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Cía. Minera Cerro Negro S.A	9
Ilustración 2: Entrada Minera Cerro Negro	11
Ilustración 3: Ubicación CÍA. Minera Cerro Negro S.A	11
Ilustración 4. Análisis FODA	16
Ilustración 5: Secado de concentrado	23
Ilustración 6: Descarga del filtro de placas	25
Ilustración 7: Carta Gantt.....	51

Índice de Tablas

Tabla 1 Análisis CAME	20
Tabla 2: Tabla comparativa	32
Tabla 3 Comparación de alternativas	48
Tabla 4: Fases del proyecto	49
Tabla 5: Resumen de costos	55
Tabla 6 Resumen de costos	57

Índice de gráficos

Gráfico 1 Costo total anual quemado de leña.....	26
Gráfico 2: Energía generada y utilizada	27
Gráfico 3: Emisiones de CO2	30
Gráfico 4: Consumo energético	31
Gráfico 5 Distribución de Costos Operativos y Ahorros Proyectados	56

SIGLAS Y SIMBOLOGIA

UF: La Unidad de Fomento (UF) es una unidad de cuenta chilena ajustada diariamente según la inflación, utilizada en créditos y bienes raíces para mantener el poder adquisitivo constante, valor de la UF 38.374 (Banco Central de Chile, 14 Diciembre 2024).

Valor del Dólar: El valor del dólar en Chile representa el tipo de cambio entre el peso chileno (CLP) y el dólar estadounidense (USD). Este valor fluctúa diariamente dependiendo de factores económicos como la oferta, la demanda y las políticas del Banco Central de Chile (Banco Central de Chile, 2024)

kWh: El kilovatio-hora (kWh) es una unidad de energía que mide el consumo eléctrico. Representa la energía utilizada por un dispositivo de 1 kilovatio de potencia funcionando durante 1 hora (International Electrotechnical Commission, 2024).

KPI: Un Indicador Clave de Desempeño (KPI) es una métrica cuantitativa que permite evaluar el grado de avance hacia objetivos estratégicos específicos y facilitar la toma de decisiones en la organización (Parmenter, 2010).

ROI: El Retorno sobre la Inversión (ROI) es una métrica financiera que mide la eficiencia y rentabilidad de una inversión, calculando la relación entre el beneficio obtenido y el costo inicial de la inversión (Brealey, Myers & Allen, 2017).

Payback Period: El Período de Recuperación de la Inversión (Payback Period) es el tiempo que tarda un proyecto o inversión en generar flujos de caja suficientes para recuperar el costo inicial de la misma (Gitman & Zutter, 2015).

RESUMEN

KEYWORDS: Secado de concentrado de cobre - Hornos rotatorios - Eficiencia energética - Sostenibilidad ambiental - Optimización operativa - Reducción de emisiones de CO₂ - Industria minera chilena.

El trabajo presenta un análisis detallado del principal problema que enfrenta la Compañía Minera Cerro Negro S.A.: los tiempos prolongados de secado del concentrado de cobre, los cuales impactan negativamente la productividad, la calidad del producto final y los costos operativos. Actualmente, el proceso de secado se realiza mediante planchas de leña, un método que ha demostrado ser ineficiente para cumplir con las demandas del mercado moderno.

Para solucionar este problema, se propone la implementación de hornos de secado de alta eficiencia, los cuales permitirán reducir significativamente los tiempos de secado, mejorar el control sobre la temperatura y la humedad del producto, y reducir los costos energéticos. Estas mejoras no solo incrementarán la capacidad operativa de la planta, sino que también optimizarán la calidad del concentrado, haciendo que Cerro Negro sea más competitiva en el mercado global.

Además, la transición hacia tecnologías más limpias reducirá el impacto ambiental de la operación, disminuyendo las emisiones de CO₂ y mejorando la sostenibilidad de la compañía. Este proyecto representa una oportunidad clave para que Cerro Negro fortalezca su posición en la industria minera, al tiempo que adopta prácticas más eficientes y responsables.

Introducción

La Compañía Minera Cerro Negro S.A. es una empresa con vasta experiencia en la industria minera chilena, centrada principalmente en la producción de cátodos y concentrados de cobre. Sin embargo, a pesar de su trayectoria y contribuciones al sector, la compañía enfrenta un desafío importante: los tiempos prolongados en el proceso de secado del concentrado de cobre. Actualmente, este proceso se lleva a cabo utilizando planchas de secado a leña, un método tradicional que, aunque funcional en el pasado, presenta ineficiencias en términos de tiempo, control de calidad y costos operativos.

En un mercado global cada vez más competitivo, la reducción de los tiempos de producción y la mejora de la calidad del producto son cruciales para mantenerse relevante. Por esta razón, Cerro Negro ha identificado la implementación de hornos de secado de alta eficiencia como una solución esencial para optimizar su operación. Esta tecnología avanzada no solo reducirá considerablemente los tiempos de secado, sino que también permitirá un control más preciso sobre la temperatura y la humedad, garantizando un producto más consistente y de mayor calidad.

Además de mejorar la productividad y la calidad del concentrado, la adopción de hornos de alta eficiencia traerá consigo beneficios económicos y ambientales. La reducción de los costos operacionales asociados al secado, así como la disminución en el uso de leña, se traducirá en una operación más eficiente y sostenible. De esta manera, la empresa no solo se alinearán con las normativas ambientales actuales, sino que también reforzará su reputación como una compañía comprometida con la responsabilidad social y ambiental.

Este trabajo se enfoca en la identificación del problema relacionado con los tiempos prolongados de secado y explora las oportunidades de mejora que se presentan a partir de la implementación de nuevas tecnologías. Al modernizar el proceso de secado, Cerro Negro podrá incrementar su capacidad operativa, reducir su impacto ambiental y consolidarse como un actor competitivo en la industria minera global.

CAPÍTULO 1: Aspectos Generales y Descripción del Problema

La Organización

Historia y contexto de la Cía. Minera Cerro Negro S.A.

Fundada hace más de 80 años, la Compañía Minera Cerro Negro S.A. se ha consolidado como una de las empresas de mediana minería más importantes de Chile, con operaciones ubicadas en la localidad de Cabildo, Región de Valparaíso. Su enfoque principal es la producción de cátodos y concentrados de cobre, utilizando avanzadas técnicas de procesamiento de minerales oxidados y sulfurados (Cerro Negro, 2024).

En sus inicios, Cerro Negro se destacó por la extracción de minerales en pequeña escala, pero con el tiempo evolucionó hasta procesar más de 15.000 toneladas mensuales de óxidos y 16.000 toneladas mensuales de sulfuros, alcanzando una producción de 180 toneladas mensuales de cátodos y 650 toneladas mensuales de concentrados (Guía Minera de Chile, 2024).

Uno de los hitos más importantes de su historia ha sido el desarrollo del proyecto Rajo Media Luna/Chiringo, que posee reservas estimadas en 4.200.000 toneladas de mineral con 1% de contenido de cobre, además de recursos adicionales de 9.900.000 toneladas con 1,09% de contenido de cobre (Guía Minera de Chile, 2024).

La empresa no solo ha impactado económicamente, sino que también ha generado un importante aporte social. Más del 75% de sus trabajadores provienen de comunidades locales, siendo una fuente de empleo crucial para Cabildo y localidades aledañas (Cerro Negro, 2024). Sin embargo, en diciembre de 2023, enfrentó la amenaza de un cierre definitivo de operaciones debido a desafíos regulatorios y ambientales, lo que generó preocupación en la comunidad (Bio Bio Chile, 2023).

A pesar de estas dificultades, en marzo de 2024, el Comité de Ministros aprobó parcialmente el recurso de reclamación de la compañía, permitiendo la continuidad de sus actividades y estableciendo un marco de cumplimiento ambiental riguroso (Guía Minera de Chile, 2024).

Hoy, la Compañía Minera Cerro Negro S.A. sigue siendo un actor clave en la minería chilena, equilibrando tradición, innovación y compromiso social para enfrentar los desafíos del futuro.

Ilustración 1: Cía. Minera Cerro Negro S.A



Fuente 1 Tomado de cerronegro.cl

Descripción del Problema

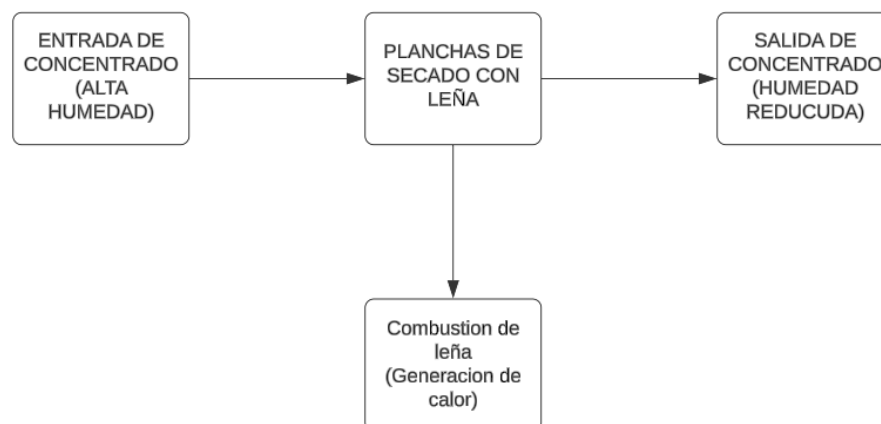
Uno de los desafíos principales que enfrenta Cerro Negro en la actualidad es el tiempo prolongado de secado del concentrado de cobre. Este proceso, que actualmente se realiza utilizando planchas de secado a leña, es ineficiente tanto en términos de tiempo como de costos operacionales. El secado del concentrado puede tardar entre 6 y 12 horas, lo que impacta negativamente en la capacidad de producción de la planta y genera cuellos de botella en la operación (C. Córdova, entrevista personal, octubre de 2024).

El método de secado con planchas de leña no solo afecta los tiempos de producción, sino también la calidad del producto final. La falta de control sobre la temperatura y la humedad durante el proceso genera concentrados con niveles de humedad variables, lo que puede afectar su valor en el mercado. Además, el uso de leña como combustible contribuye a un alto consumo de energía y genera un impacto ambiental considerable.

Este problema se traduce en costos operativos elevados y una menor competitividad frente a otras empresas que han adoptado tecnologías más modernas. Para solucionar este inconveniente, Cerro Negro está evaluando la implementación de hornos de secado de alta eficiencia, que permitirán reducir significativamente los tiempos de secado, mejorar la uniformidad del producto final y disminuir los costos asociados al proceso.

La implementación de estos hornos es fundamental no solo para mejorar los tiempos de secado, sino también para aumentar la capacidad de producción de la planta y optimizar los recursos energéticos utilizados en el proceso. Además, reducirá la huella ambiental de la empresa, alineándose con las crecientes demandas de sostenibilidad en la industria minera.

Diagrama 1: Proceso de Secado en Planchas de Leña



Fuente 2 Elaboración propia para el proyecto

Ubicación geográfica y relevancia en la minería chilena

Cerro Negro está estratégicamente ubicada en Hacienda Los Ángeles S/N, Pitipeumo, Cabildo, en la provincia de Petorca, región de Valparaíso. Esta ubicación les proporciona acceso eficiente a los puertos cercanos, lo que facilita la exportación de su producción de cobre a los mercados internacionales. La región de Valparaíso cuenta con una rica tradición minera, lo que ha permitido que Cerro Negro se beneficie de una infraestructura robusta que apoya sus operaciones. Esta ubicación estratégica, combinada con el apoyo de las comunidades locales, ha sido clave para que la empresa opere de manera eficiente y sostenible.

La relación cercana que mantiene Cerro Negro con las comunidades locales ha sido un factor determinante en su éxito. A través de proyectos sociales y ambientales, la empresa contribuye a mejorar la calidad de vida de los habitantes de la zona. Este compromiso con la sostenibilidad y el desarrollo comunitario es fundamental para la visión a largo plazo de Cerro Negro, asegurando que su operación no solo sea rentable, sino también responsable y alineada con los valores de la comunidad.

Ilustración 3: Ubicación CÍA. Minera Cerro Negro S.A



Fuente 3 Google Maps

Ilustración 2: Entrada Minera Cerro Negro



Fuente 4 Google Maps

Misión

La misión de la Compañía Minera Cerro Negro S.A. es ser una empresa dedicada a la extracción de minerales, con un enfoque estratégico en la producción de cátodos y concentrados de cobre. Buscamos maximizar nuestra rentabilidad a través de la implementación de proyectos sustentables e innovadores que nos permitan optimizar nuestros procesos y recursos. Este compromiso se refleja en nuestra constante búsqueda de soluciones tecnológicas que no solo mejoren la eficiencia operativa, sino que también reduzcan el impacto ambiental.

La seguridad de nuestros colaboradores es uno de nuestros pilares fundamentales, por lo que implementamos prácticas rigurosas en el lugar de trabajo, garantizando un ambiente seguro y eficiente. A su vez, trabajamos con un profundo respeto por el medio ambiente, utilizando tecnologías que minimicen nuestra huella ecológica y que aseguren que nuestras operaciones sean lo más limpias y responsable posible. También reconocemos la importancia de nuestras comunidades vecinas, a quienes apoyamos mediante iniciativas que promuevan su desarrollo y bienestar, reafirmando nuestro compromiso social.

Visión

Nuestra visión es consolidarnos como una empresa líder en la industria minera, reconocida por nuestra capacidad de innovación y excelencia en la producción de cobre. Aspiramos a ser un referente en el uso de tecnologías avanzadas, que nos permitan optimizar nuestros tiempos de producción, reducir costos y aumentar la competitividad en un mercado global cada vez más exigente.

Nuestro enfoque hacia la innovación no solo tiene el objetivo de mejorar nuestros resultados económicos, sino también de avanzar hacia un modelo de minería más sostenible. Nos proponemos adoptar prácticas que integren los principios de la minería responsable, priorizando el desarrollo de tecnologías limpias, la eficiencia energética y la gestión ambiental. De esta manera, buscamos no solo contribuir al crecimiento de la industria minera en Chile, sino también liderar con el ejemplo en la adopción de prácticas que sean beneficiosas tanto para nuestro entorno como para las generaciones futuras.

Estrategia Organizacional

La estrategia de la Compañía Minera Cerro Negro S.A. está construida sobre tres pilares clave: eficiencia operativa, seguridad laboral y sostenibilidad ambiental. Estos principios son los que nos guían para mantenernos competitivos y responsables, tanto dentro de la industria minera como en las comunidades con las que trabajamos.

Eficiencia Operativa

En Cerro Negro buscamos constantemente mejorar nuestros procesos para ser más eficientes. Un ejemplo claro de esto es la implementación de hornos de secado de alta eficiencia para el concentrado de cobre. Esta nueva tecnología nos permitirá reducir los tiempos de secado, mejorar la calidad del producto final y, al mismo tiempo, disminuir los costos operativos.

La idea es que, al optimizar nuestras operaciones, podamos ser más competitivos en el mercado global del cobre, sin perder de vista la importancia de la sostenibilidad y el control de los recursos. Además, nos permite reaccionar mejor a los cambios del mercado y aprovechar al máximo las oportunidades que se presenten.

Seguridad Laboral

La seguridad de nuestro equipo es lo más importante. Nos aseguramos de que todos nuestros colaboradores trabajen en un entorno seguro y controlado, con acceso a la mejor capacitación y equipos de seguridad disponibles. Implementamos programas continuos de formación y revisamos constantemente los protocolos para minimizar los riesgos.

Con las nuevas tecnologías, como los hornos de secado, también buscamos reducir el trabajo manual en áreas de mayor riesgo, como aquellas que requieren exposición a fuentes de calor, mejorando así las condiciones laborales y reduciendo accidentes.

Sostenibilidad Ambiental

Para nosotros, la sostenibilidad no es solo un requisito, es un compromiso real. Sabemos que la minería tiene un impacto ambiental, por eso nos esforzamos por reducirlo al mínimo. Con la implementación de los hornos de alta eficiencia, estamos dando un paso importante hacia la reducción de las emisiones de CO₂ y el consumo energético. Esta medida no solo nos beneficia en términos operativos, sino que también contribuye a un medio ambiente más limpio.

Además, estamos comprometidos con las comunidades cercanas a nuestras operaciones. Nos involucramos en proyectos que promueven el desarrollo social y ambiental, buscando un equilibrio entre nuestras operaciones y el bienestar de los habitantes de la zona.

Innovación Continua

La innovación es clave para seguir avanzando. Siempre estamos buscando formas de mejorar nuestros procesos, ya sea a través de nuevas tecnologías, mejores prácticas o la automatización de tareas. Al apostar por la innovación tecnológica, podemos reducir costos, optimizar nuestros recursos y operar de manera más eficiente y responsable.

Relación con la Comunidad

Entendemos que el éxito de una empresa no solo depende de sus números, sino también de las relaciones que construye. Por eso, en Cerro Negro trabajamos de la mano con las comunidades cercanas, participando en proyectos sociales y ambientales que mejoren su calidad de vida. Creemos que una buena relación con la comunidad nos permite operar de forma más armónica y sostenible en el tiempo.

Análisis FODA

Análisis FODA de la Compañía Minera Cerro Negro S.A.

El Análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) nos permite entender mejor nuestra situación actual y las áreas clave en las que debemos enfocarnos para seguir mejorando. Este análisis nos da una visión clara de dónde estamos y hacia dónde podemos dirigirnos para ser más competitivos y sostenibles.

Fortalezas

1. **Trayectoria y experiencia:** Cerro Negro tiene una larga historia en la minería chilena, lo que nos otorga una sólida reputación y conocimiento profundo de la industria.
2. **Innovación tecnológica:** Estamos implementando hornos de secado de alta eficiencia, lo que nos permitirá optimizar los tiempos de producción, reducir costos y mejorar la calidad del concentrado de cobre.
3. **Compromiso con la sostenibilidad:** La empresa está comprometida con reducir su impacto ambiental, adoptando tecnologías más limpias y eficientes para disminuir las emisiones y el consumo de recursos.
4. **Relación con la comunidad:** Hemos desarrollado fuertes lazos con las comunidades cercanas a nuestras operaciones, participando en proyectos sociales y ambientales que generan confianza y colaboración.
5. **Foco en la seguridad:** La seguridad de nuestros colaboradores es una prioridad, y contamos con sistemas de gestión y capacitación que garantizan un entorno laboral seguro.

Oportunidades

1. **Demanda global de cobre:** El crecimiento de la demanda de cobre a nivel mundial, impulsada por la transición hacia energías renovables y la electrificación, representa una oportunidad clave para aumentar nuestra producción y expandir nuestra presencia en el mercado.
2. **Adopción de nuevas tecnologías:** La industria minera está en constante evolución tecnológica, y Cerro Negro tiene la oportunidad de seguir adoptando innovaciones que mejoren la eficiencia y reduzcan costos operativos.
3. **Mejora de la eficiencia energética:** Con la implementación de hornos de secado de alta eficiencia, podemos reducir significativamente los costos energéticos y operativos, lo que nos permitirá ser más competitivos.
4. **Fortalecimiento de la marca a través de la sostenibilidad:** En un mundo cada vez más enfocado en la sostenibilidad, Cerro Negro puede destacar por sus esfuerzos en la reducción de emisiones y su compromiso ambiental, ganando una mejor posición frente a clientes e inversores.

Debilidades

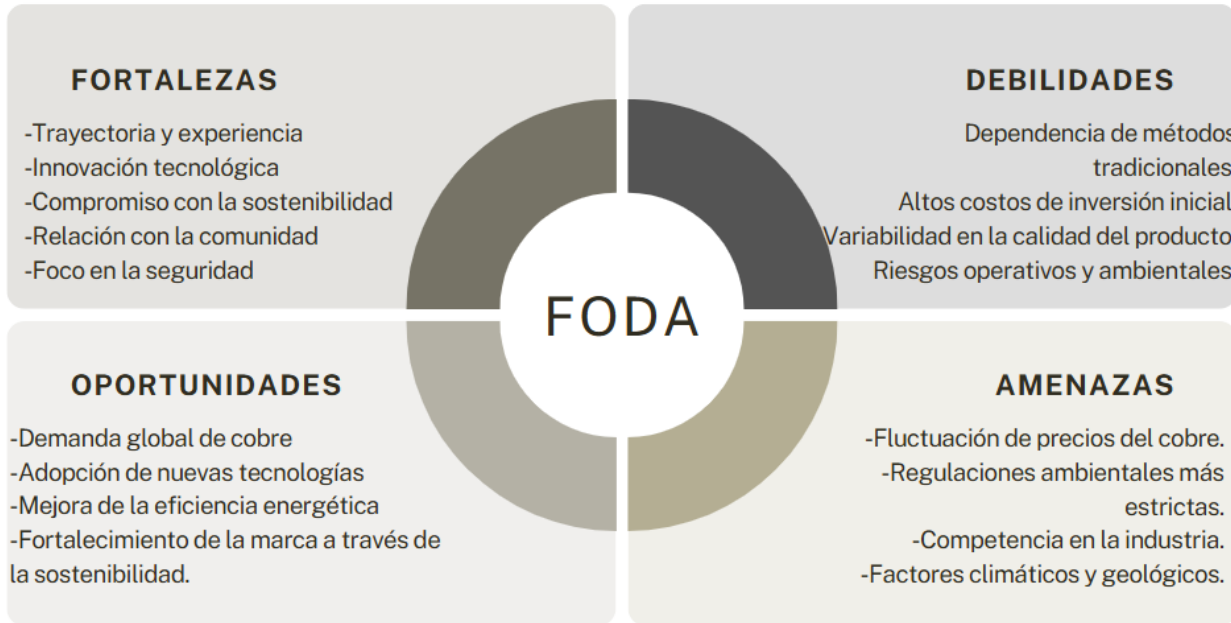
1. **Dependencia de métodos tradicionales:** Aunque estamos implementando nuevas tecnologías, todavía dependemos en cierta medida de métodos tradicionales de secado, lo que puede limitar nuestra capacidad de respuesta ante la demanda del mercado.
2. **Altos costos de inversión inicial:** La adopción de nuevas tecnologías, como los hornos de secado, requiere una inversión significativa, lo que puede ser un desafío en el corto plazo antes de ver los beneficios a largo plazo.
3. **Variabilidad en la calidad del producto:** Aún enfrentamos problemas de variabilidad en la humedad del concentrado de cobre, lo que puede afectar la consistencia de la calidad del producto final.
4. **Riesgos operativos y ambientales:** Las operaciones mineras siempre conllevan riesgos, desde accidentes laborales hasta impactos ambientales, que debemos gestionar cuidadosamente.

Amenazas

1. **Fluctuación de precios del cobre:** La volatilidad del precio del cobre en los mercados internacionales puede afectar nuestra rentabilidad y previsibilidad operativa.
2. **Regulaciones ambientales más estrictas:** La creciente presión por parte de las normativas ambientales puede incrementar los costos operativos y demandar nuevas inversiones para cumplir con los estándares.

3. **Competencia en la industria:** Otras compañías mineras, tanto nacionales como internacionales, están adoptando rápidamente tecnologías similares, lo que puede aumentar la competencia en términos de costos y eficiencia.
4. **Factores climáticos y geológicos:** Las condiciones climáticas extremas o eventos geológicos imprevistos pueden afectar nuestras operaciones, generando interrupciones en la producción.

Ilustración 4. Análisis FODA



Fuente 5 Elaboración propia para el proyecto

Análisis CAME de la Matriz FODA

El Análisis CAME (Corregir, Afrontar, Mantener, Explotar) nos permite desarrollar estrategias específicas basadas en el análisis FODA, para mejorar nuestras debilidades, enfrentar las amenazas, mantener nuestras fortalezas y aprovechar las oportunidades.

Corregir

Estas son las áreas donde identificamos debilidades y necesitamos tomar medidas correctivas para mejorar la operación de Cerro Negro:

- **Dependencia de métodos tradicionales:** Aunque estamos adoptando tecnologías más eficientes como los hornos de secado, necesitamos acelerar la transición completa desde métodos tradicionales de secado, como el uso de planchas de leña, para optimizar aún más los tiempos de producción y reducir la variabilidad en la calidad del concentrado.

- **Variabilidad en la calidad del producto:** Implementar controles más precisos sobre la humedad y otros parámetros críticos durante el secado del concentrado para garantizar una mayor consistencia en la calidad del producto final.
- **Altos costos de inversión inicial:** Desarrollar estrategias de financiamiento a largo plazo para afrontar las inversiones en nuevas tecnologías, asegurando que los beneficios operacionales a largo plazo compensen los costos iniciales.

Afrontar

Estas son las amenazas identificadas en el análisis FODA que debemos enfrentar de manera proactiva:

- **Fluctuación de precios del cobre:** Diversificar nuestras operaciones o buscar contratos de suministro a largo plazo con clientes clave para mitigar el impacto de la volatilidad del precio del cobre en el mercado internacional.
- **Regulaciones ambientales más estrictas:** Anticiparnos a los cambios en las normativas ambientales, adoptando prácticas más sostenibles y mejorando continuamente nuestro desempeño en términos de emisiones y uso de energía, para evitar sanciones y cumplir con los estándares futuros.
- **Competencia en la industria:** Innovar continuamente en procesos y tecnología para mantenernos competitivos. Invertir en mejoras operativas y en la capacitación de nuestro personal para diferenciarnos por la calidad de nuestro producto y la eficiencia de nuestros procesos.
- **Factores climáticos y geológicos:** Implementar planes de contingencia para enfrentar posibles interrupciones en la producción causadas por eventos climáticos extremos o condiciones geológicas inesperadas. La diversificación de las zonas de explotación y mejoras en la infraestructura pueden mitigar estos riesgos.

Mantener

Estas son las fortalezas que debemos seguir manteniendo para asegurar el éxito continuo de Cerro Negro:

- **Innovación tecnológica:** Continuar con la implementación de tecnologías avanzadas, como los hornos de secado de alta eficiencia, y seguir invirtiendo en investigación y desarrollo para mejorar constantemente nuestras operaciones.
- **Compromiso con la sostenibilidad:** Seguir promoviendo prácticas sustentables que reduzcan nuestro impacto ambiental y fortalezcan la reputación de Cerro Negro como una empresa responsable. Mantener y mejorar los esfuerzos en reducción de emisiones y gestión de recursos.

- **Relación con la comunidad:** Mantener el vínculo positivo con las comunidades locales, apoyando proyectos sociales y ambientales que beneficien a los habitantes y refuercen la colaboración a largo plazo.
- **Seguridad laboral:** Continuar con nuestros programas de formación y gestión de riesgos para asegurar un entorno laboral seguro, minimizando los accidentes y mejorando continuamente las condiciones de trabajo.

Explotar

Estas son las oportunidades que debemos aprovechar para seguir creciendo y mejorando:

- **Demanda global de cobre:** Aprovechar el aumento de la demanda de cobre, especialmente debido a la transición energética global, para expandir nuestras operaciones y mejorar la capacidad productiva mediante tecnologías más eficientes que nos permitan aumentar el volumen de producción.
- **Adopción de nuevas tecnologías:** Seguir incorporando avances tecnológicos para optimizar todos los aspectos de la producción, desde la extracción hasta el secado del concentrado de cobre. Esto nos ayudará a ser más eficientes y competitivos, reduciendo costos y mejorando la calidad del producto.
- **Mejora de la eficiencia energética:** Aprovechar los beneficios de la eficiencia energética que brindan los hornos de secado de alta eficiencia para reducir los costos operativos y las emisiones, mejorando tanto nuestra competitividad como nuestra sostenibilidad.
- **Fortalecimiento de la marca a través de la sostenibilidad:** Potenciar nuestra imagen como una empresa comprometida con el medio ambiente y la responsabilidad social, utilizando nuestras iniciativas de sostenibilidad como una ventaja competitiva frente a clientes e inversores que valoran cada vez más este enfoque.

Tabla de análisis CAME

	Estrategia	Impacto Esperado
Corregir	Dependencia de métodos tradicionales	Reducción de tiempos y mejora de calidad
	Variabilidad en la calidad del producto	Mayor consistencia y satisfacción del cliente
	Altos costos de inversión inicial	Viabilidad financiera para innovación
Afrontar	Fluctuación de precios del cobre	Estabilidad financiera frente a fluctuaciones
	Regulaciones ambientales más estrictas	Cumplimiento normativo y prevención de sanciones
	Competencia en la industria	Ventaja competitiva en el mercado
	Factores climáticos y geológicos	Minimización de interrupciones productivas
Mantener	Innovación tecnológica	Operaciones más eficientes y competitivas
	Compromiso con la sostenibilidad	Reputación como empresa responsable
	Relación con la comunidad	Fortalecimiento de relaciones comunitarias
	Seguridad laboral	Entorno laboral seguro y eficiente
Explotar	Demanda global de cobre	Incremento de capacidad y mayores ingresos
	Adopción de nuevas tecnologías	Reducción de costos y mejora competitiva

	Mejora de la eficiencia energética	Ahorro energético y sostenibilidad
	Fortalecimiento de la marca a través de la sostenibilidad	Reputación fortalecida y atracción de inversores

Fuente 6 Elaboración propia para el proyecto

Tabla 1 Análisis CAME

Descripción del Problema

El principal desafío que enfrenta la Compañía Minera Cerro Negro en su proceso de secado de concentrado de cobre es el tiempo prolongado que este requiere. Actualmente, el secado se realiza mediante planchas de leña, un método tradicional que, aunque ha sido utilizado durante años, presenta importantes ineficiencias. Este proceso puede tardar entre 6 y 12 horas, dependiendo de factores como las condiciones climáticas, la cantidad de concentrado y la eficiencia en la quema de leña (C. Córdova, coordinadora de planta, entrevista personal, octubre de 2024). Estos tiempos prolongados afectan directamente la productividad de la planta, limitando su capacidad operativa y reduciendo la competitividad de la empresa en el mercado global.

El uso de planchas de leña también presenta falta de control preciso sobre la temperatura, lo que genera variabilidad en la calidad del concentrado secado. Esta falta de uniformidad en el contenido de humedad del producto final es un problema constante, ya que los clientes prefieren concentrados con un nivel de humedad consistente. Las inconsistencias en la humedad pueden hacer que el producto sea rechazado o vendido a un precio inferior, lo que genera pérdidas de valor en el mercado (C. Córdova, coordinadora de planta, entrevista personal, octubre de 2024).

Dado que el tiempo de secado es un factor crítico, el uso de tecnologías más eficientes se vuelve indispensable para mejorar el rendimiento de la planta. La implementación de hornos de secado de alta eficiencia no solo permitiría reducir significativamente los tiempos de secado, sino que también mejoraría la productividad general y la calidad del concentrado. Además, esta tecnología ofrecería un mayor control sobre la temperatura y la humedad durante el proceso, lo que resultaría en un producto final más uniforme y de mejor calidad para el mercado. Con la adopción de estos hornos, Cerro Negro no solo podría incrementar su capacidad productiva, sino también mejorar su posición competitiva en un mercado global cada vez más exigente, donde la eficiencia y la calidad son claves para el éxito.

Objetivo general y específicos.

Objetivo General

- Optimizar los tiempos de secado del concentrado de cobre en la Compañía Minera Cerro Negro S.A., mediante la implementación de hornos de secado de alta eficiencia que permitan aumentar la capacidad operativa, mejorar la calidad del producto final y reducir los costos operacionales asociados al proceso de secado.

Objetivos Específicos

- Identificar las limitaciones actuales en los tiempos de secado utilizando planchas de leña, analizando los factores que influyen en la prolongación del proceso y su impacto en la productividad de la planta.
- Evaluar las tecnologías emergentes en hornos de secado, comparando sus tiempos de operación con el método tradicional de planchas de leña, así como su impacto en la eficiencia energética y la uniformidad del producto.
- Realizar un análisis de viabilidad técnica y económica para la implementación de hornos de secado, considerando los costos de inversión inicial, reducción en tiempos de secado, costos operacionales y beneficios asociados a la mejora en los tiempos de procesamiento.
- Proponer un plan de implementación para la adopción de hornos de secado, con el objetivo de garantizar una transición fluida y eficiente que minimice el tiempo requerido para cada ciclo de secado y mejore la competitividad de la empresa.

CAPÍTULO 2: Identificación del Problema y Oportunidades de Mejora

Identificación del Problema

El proceso de secado del concentrado de cobre constituye una etapa crítica en la operación de la Compañía Minera Cerro Negro SA. Actualmente, esta actividad se lleva a cabo mediante el calentamiento de planchas metálicas con brasas de leña, un método, aunque funcional en el pasado, ha quedado desactualizado frente a las demandas operativas, económicas y ambientales modernas.

Entre las principales limitaciones de este método tradicional se destacan los elevados costos energéticos, la ineficiencia en los tiempos de secado, la inconsistencia en la calidad del producto final y su significativo impacto ambiental. Estas restricciones no solo afectan la operación interna de la compañía, sino también su capacidad para competir en un mercado global que exige procesos más sostenibles y eficientes.

Este capítulo analiza en profundidad estas limitaciones, evaluando sus efectos en el desempeño de la operación. Asimismo, se propone la implementación de hornos rotatorios de calor directo como una solución innovadora que busca optimizar la eficiencia operativa, reducir la huella ambiental y fortalecer la posición competitiva de la Compañía Minera Cerro Negro SA en la industria minera.

Descripción detallada del problema

El proceso actual de secado de concentrado de cobre mediante el uso de brasas de leña es una práctica que, aunque funcional en el pasado, hoy presenta importantes limitaciones que afectan negativamente la operación de la Compañía Minera Cerro Negro SA. Estas deficiencias impactan la eficiencia operativa, incrementan los costos de producción y generan problemas de sostenibilidad ambiental y calidad del producto. Estas restricciones no solo afectan la competitividad de la empresa, sino también su capacidad para alinearse con las exigencias de la industria minera moderna y con los estándares regulatorios internacionales.

Ilustración 5: Secado de concentrado



Fuente 7 Fotografía tomada por el autor

Descripción del Equipo previo al Secado

Filtro de Placa

La Compañía Minera Cerro Negro S.A. emplea un filtro de placa como parte de su proceso de secado de concentrado de cobre. Este equipo es clave para la reducción de humedad del concentrado, y su funcionamiento tiene un impacto directo en la eficiencia operativa de la planta.

Características del Filtro de Placa

Número de Placas: El filtro de placa consta de un total de 24 placas:

- 2 placas fijas.
- 22 placas móviles.

Este diseño permite un proceso eficiente de filtración y descarga del concentrado de cobre.

Descarga por Ciclo:

- El filtro tiene una descarga de 1,5 toneladas por ciclo. Este valor es crucial para determinar la capacidad de procesamiento del equipo y su impacto en la producción diaria de concentrado de cobre. (C. Córdova, coordinadora de planta, entrevista personal, octubre de 2024).

Porcentaje de Humedad:

- El concentrado de cobre que pasa por el filtro tiene un promedio de humedad del 13%. Este nivel de humedad es un indicador clave de la eficiencia del proceso de secado y la calidad del concentrado producido. (C. Córdova, coordinadora de planta, entrevista personal, octubre de 2024).

Ciclos por Turno:

- Durante cada turno, el filtro realiza 15 ciclos de descarga, lo que significa que en un turno se procesan aproximadamente 22,5 toneladas de concentrado. Este valor es relevante para calcular la capacidad de producción diaria de la planta. A lo que da como resultado una producción de 16.200 ton/año de concentrado de cobre. (C. Córdova, coordinadora de planta, entrevista personal, octubre de 2024).

Ilustración 6: Descarga del filtro de placas



Fuente 8: Fotografía tomada por el autor

Consumo Actual de Leña

El proceso de secado del concentrado de cobre en la planta de la Compañía Minera Cerro Negro S.A., ubicada en la Quinta Región, consume aproximadamente 1.080 toneladas anuales de leña, principalmente de eucalipto y palto (C. Córdova, coordinadora de planta, entrevista personal, octubre de 2024). Esta leña es adquirida en el mercado local, donde los precios varían dependiendo del tipo y formato de venta:

Eucalipto: Según estudios realizados en ciudades cercanas, el precio de la leña de eucalipto oscila entre 0,78 UF y 1,30 UF por metro cúbico, dependiendo de si se compra en formato seco y certificado, considerando un valor de la UF de 38.374,60 al 20 de diciembre de 2024 (SII, 2024; MercadoLibre, 2024).

Palto: Aunque menos comercializado que el eucalipto, el precio promedio de la leña de palto es similar al de otras maderas frutales, con valores entre 0,31 UF a 0,39 UF por metro cúbico (MercadoLibre, 2024).

Costo Total Estimado Anual

Dado que 1 metro cúbico de leña equivale aproximadamente a 0,65 toneladas de madera seca, el consumo de 1.080 toneladas implica un uso de 1.662 metros cúbicos anuales. Esto se traduce en un costo estimado de:

Eucalipto: Entre 1.299,30 UF y 2.165,49 UF anuales.

Palto: Entre 519,72 UF y 649.65 UF, dependiendo de la calidad y disponibilidad.

Esta dependencia de recursos no renovables representa un desafío significativo tanto a nivel económico como ambiental, dado el impacto asociado a la deforestación y emisiones de carbono generadas por la combustión de madera.

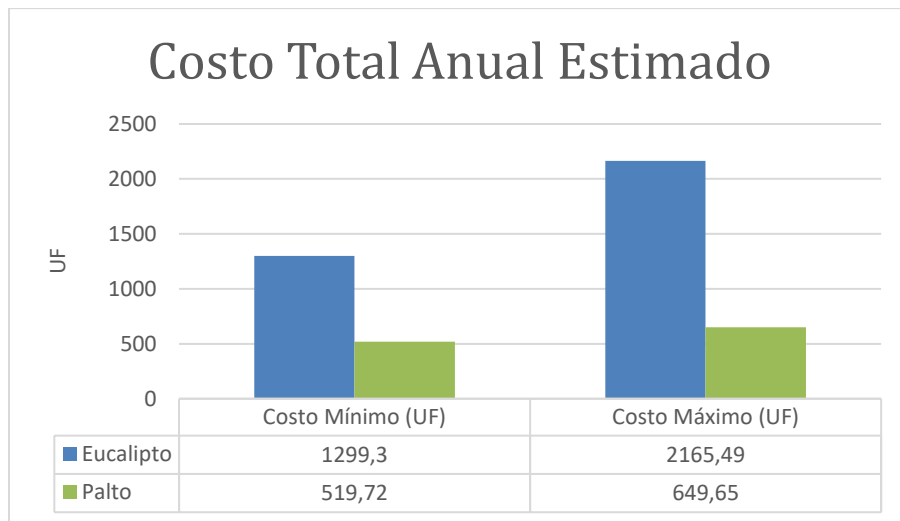


Gráfico 1 Costo total anual quemado de leña

Fuente 9 Elaboración propia para el proyecto

Cálculo del Consumo Energético

El **poder calorífico** de la leña varía según la especie y su nivel de secado. Para leña seca (con un contenido de humedad inferior al 20%), los valores promedio son los siguientes:

- Eucalipto: Tiene un poder calorífico promedio de aproximadamente 4,2 kWh/kg, equivalente a 3.612 kcal/kg (E-Ficiencia, s.f.).
- Palto: Como una madera dura frutal, presenta un poder calorífico similar, que varía entre 4,0 y 4,5 kWh/kg, dependiendo de su nivel de secado (Santi Avellí, s.f.).

Este poder calorífico convierte a estas maderas en fuentes de energía competitivas para aplicaciones industriales, aunque el impacto ambiental asociado a su combustión sigue siendo un desafío relevante para su sostenibilidad.

Energía Producida Anualmente

Considerando un poder calorífico promedio de 4,3 kWh/kg y un consumo de 1.080.000 kg (1.080 toneladas):

$$\text{Energía total anual (kWh)} = 1.080.000 \text{ kg} \times 4,3 \text{ kWh/kg}$$

$$\text{Energía Total anual} = 4.644.000 \text{ kWh}$$

Eficiencia del Método Actual:

En métodos tradicionales como el calentamiento con brasas de leña, la eficiencia es del 60-70%, lo que implica que solo se aprovechan entre 2.786.400 y 3.250.800 kWh anuales del total generado, mientras el resto se pierde en el proceso.

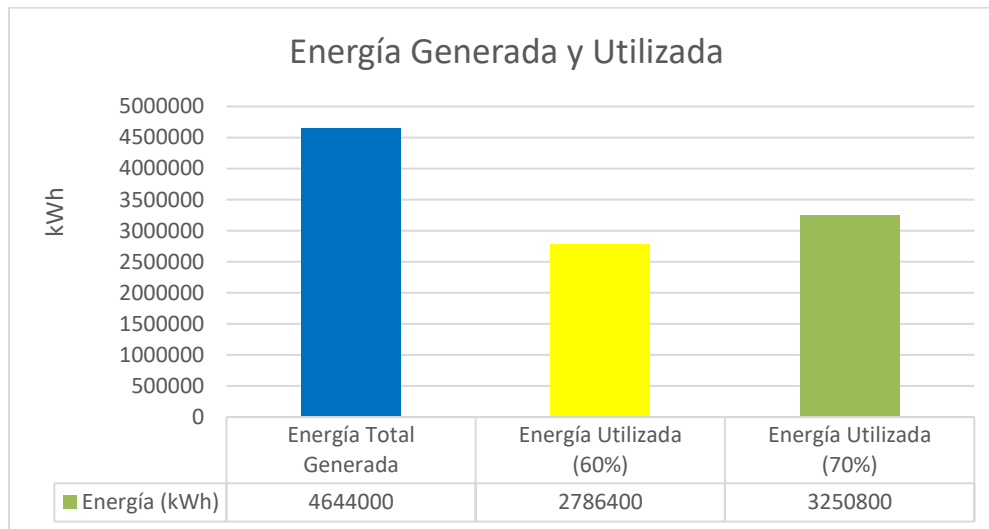


Gráfico 2: Energía generada y utilizada

Fuente 10 Elaboración propia para el proyecto

Beneficios al Implementar un Horno de Secado

Beneficios Operativos

Reducción de tiempos de secado:

La implementación de **hornos rotatorios** en procesos industriales genera importantes beneficios operativos, especialmente en términos de reducción de tiempos de secado y aumento de la productividad:

- **Reducción de tiempos de secado:** Los hornos rotatorios permiten disminuir los tiempos de procesamiento de 6-12 horas a solo 1-2 horas por lote, optimizando significativamente la eficiencia operativa (Kindle-Tech, s.f.).
- **Eliminación de cuellos de botella:** Este cambio elimina los cuellos de botella en la operación, permitiendo un aumento en la capacidad diaria de procesamiento (Kindle-Tech, s.f.).
- **Incremento de productividad:** Una planta que anteriormente procesaba 2 lotes diarios podría ahora alcanzar entre 8 y 12 lotes diarios, optimizando el flujo operativo y reduciendo los costos asociados al tiempo de operación (Kindle-Tech, s.f.).

Ahorro energético:

- Con un consumo reducido a 200 kWh por tonelada, los hornos rotatorios logran una eficiencia energética del 90%, superando ampliamente el 60% de los sistemas actuales basados en brasas de leña.
- Esta mejora no solo disminuye los costos operativos, sino que también libera capacidad energética para otras etapas de producción, optimizando el uso de recursos en la planta.

Uniformidad en el secado:

- El control automatizado asegura un contenido de humedad residual uniforme, eliminando las variaciones de hasta un 3% observadas en métodos tradicionales (Logica, s.f.). Esto mejora la consistencia del producto y reduce problemas en las etapas posteriores del procesamiento (Consejo de Competencias Mineras, 2019).
- Una mayor uniformidad en el secado disminuye las tasas de rechazo por humedad inconsistente, aumentando el valor del concentrado en los mercados internacionales. Este avance permite cumplir con los estrictos estándares de calidad exigidos por clientes globales (Serviex Ltda., s.f.). Además, la automatización del proceso contribuye a reducir costos operativos y optimizar el uso de energía (Redalyc, 2017).

Automatización del proceso:

- Los hornos rotatorios eliminan la dependencia del factor humano para el control de brasas, reduciendo la probabilidad de errores operativos y garantizando una operación más segura y estandarizada.

Beneficios ambientales

Reducción de emisiones de CO₂:

- Se proyecta una disminución del 70% en las emisiones, pasando de 109,8 toneladas a solo 32,9 toneladas de CO₂ anuales. Este cambio posiciona a la empresa en línea con los objetivos del Acuerdo de París, cuyo propósito es limitar el calentamiento global por debajo de los 2 °C en comparación con niveles preindustriales y, si es posible, restringirlo a 1,5 °C (Naciones Unidas, s.f.; Ministerio para la Transición Ecológica, s.f.).
- La reducción de emisiones fortalece el compromiso de la empresa con las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC), las cuales detallan las medidas necesarias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, en línea con el marco establecido por el Acuerdo de París (Naciones Unidas, s.f.).

Eliminación del consumo de leña:

- La transición elimina el consumo anual de 1.080 kg de leña, reduciendo la presión sobre los recursos forestales y contribuyendo a la conservación del medio ambiente.

- Además, se eliminan los costos logísticos asociados al transporte y almacenamiento de leña, simplificando la cadena de suministro y mejorando la eficiencia general.

Reducción de residuos sólidos:

- Al eliminar las cenizas generadas por las brasas, los hornos rotatorios disminuyen los costos de disposición de residuos y eliminan un factor de contaminación en las áreas operativas.

Cumplimiento regulatorio:

- Este cambio facilita la certificación ambiental, como la ISO 14001, reforzando la percepción de la empresa como una operación sostenible y responsable.

Incremento en la Competitividad

Mejor calidad del producto:

- El producto final, con características uniformes y un contenido de humedad optimizado, responde a las demandas de mercados internacionales exigentes, como los de Europa y Asia.
- Esto permite la negociación de precios más altos y reducir el riesgo de devoluciones o penalizaciones por calidad inconsistente.

Reputación empresarial:

- La adopción de tecnología moderna posiciona a Cerro Negro como líder en innovación y sostenibilidad dentro del sector minero, fortaleciendo su imagen frente a clientes e inversores.

Acceso a nuevos mercados:

- La reducción de emisiones y la mejora en la calidad del producto abren oportunidades para exportar a mercados que exigen altos estándares ambientales y de calidad, consolidando la posición de la empresa como proveedor confiable.

Eficiencia económica:

- Con un ahorro proyectado de 1.538,52 UF anuales y una recuperación de inversión en menos de 3 años, los hornos rotatorios representan una inversión estratégica y financieramente viable.

Cálculo de Emisiones de CO₂ Anuales

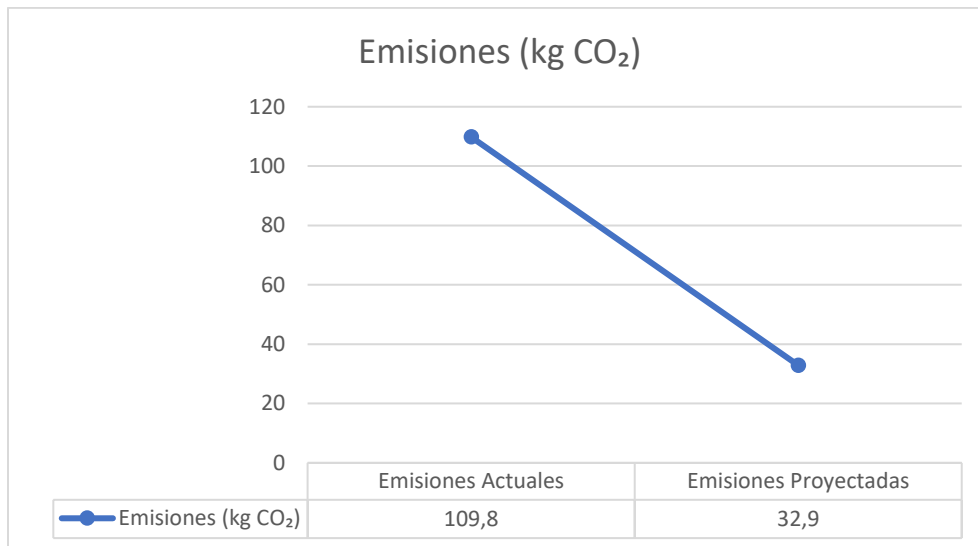
Esta fórmula calcula la cantidad de dióxido de carbono emitida de forma anual como resultado de la combustión de madera en el proceso de secado. El consumo anual de madera representa la cantidad total utilizada en el año, en este caso 68,625 kg. El factor

de emisión, basado en datos técnicos de las (*Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero* (2006), es 1,6 kg CO₂/kg madera. Esto significa que por cada kilogramo de madera quemada se emiten 1,6 kg de dióxido de carbono.

$$68,625/\text{año} \times 1,6 \text{ kg CO}_2/(\text{kg madera}) = 109.800 \text{ kg CO}_2/\text{año}$$

Al convertirlo a toneladas:

$$109,8 \text{ CO}_2/\text{año} = 109.8 \text{ CO}_2/\text{año}$$



Fuente 11 Elaboración propia para el proyecto

Gráfico 3: Emisiones de CO₂

Cálculo del Ahorro Energético Anual

Este cálculo estima la cantidad de energía eléctrica que se puede ahorrar con la implementación de hornos rotatorios. Actualmente, el método consume **450 kWh/ton** , mientras que el nuevo método reduce el consumo a **250 kWh/ton** . La producción anual es de **1.000 toneladas**.

Ahorro Energético Anual (KWh)= (Consumo Energético Actual KWh/Ton) – Consumo Energético Propuesto KWh/Ton x Producción Anual (tonelada)

$$\begin{aligned} \text{Ahorro energetico anual (kWh)} &= (450 \text{ kWh/ton} - 250 \text{ kWh/ton}) \times 1000 \\ &= 200.000 \text{ kWh/año} \end{aligned}$$

El ahorro de **200.000 kWh anuales** demuestra la eficiencia energética del método propuesto y su impacto en la sostenibilidad operativa.

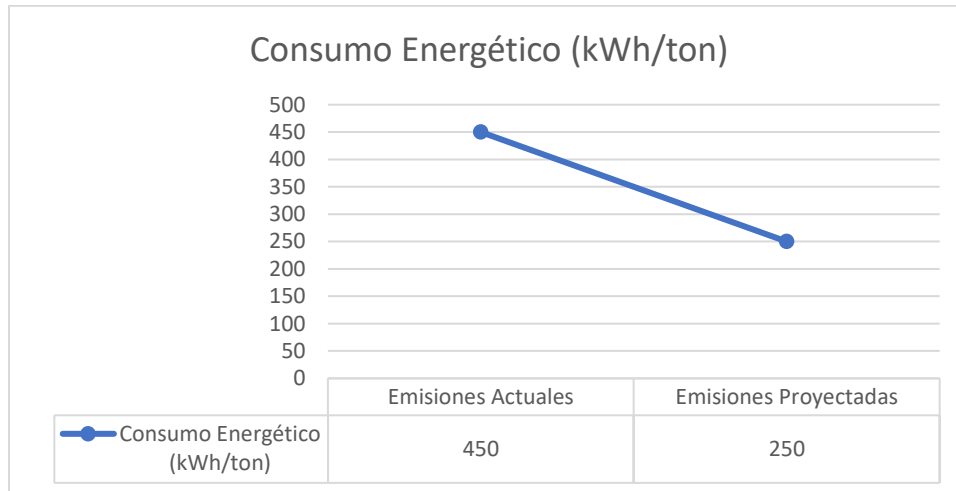


Gráfico 4: Consumo energético

Fuente 12 Elaboración propia para el proyecto

Beneficios a Largo Plazo

La implementación de hornos rotatorios traerá beneficios financieros a largo plazo que fortalecerán la posición competitiva de la compañía.

Sostenibilidad financiera:

- Una vez recuperada la inversión inicial, la compañía disfrutará de ahorros netos anuales, lo que permitirá una mejora significativa en la rentabilidad operativa.

Cumplimiento ambiental:

- Con la reducción de las emisiones de CO₂ en un **70%** y la eliminación del uso de madera, la empresa no solo cumple con las normativas ambientales, sino que también mejora su reputación en el mercado como una empresa sostenible.

Mejor competitividad:

- Al reducir los costos operativos y mejorar la calidad del producto, la empresa podrá ofrecer precios más competitivos en los mercados internacionales, fortaleciendo su posición como proveedor confiable.

Aspecto	Método Actual	Hornos Rotatorios	Diferencia
Consumo Energético	450 kWh/ton	250 kWh/ton	-200 kWh/ton
Tiempo de Secado	6-12 horas	1-2 horas	-5 a -10 horas
Emisiones de CO ₂	109.8 ton/añual	32.9 ton/añual	-76.9 ton/añual

Tabla 2: Tabla comparativa

Fuente 13: Elaboración propia para el proyecto

Estudios de Casos Relevantes

Los estudios de casos representan herramientas fundamentales para comprender cómo otras organizaciones han abordado desafíos similares, adaptando tecnologías innovadoras a sus procesos productivos. La implementación de hornos rotatorios en grandes operaciones mineras en Chile ha demostrado beneficios tangibles en términos de sostenibilidad, eficiencia y cumplimiento normativo. A continuación, se presentan dos casos significativos: Minera Escondida y División El Teniente de Codelco.

Caso 1: Minera Escondida (Chile)

Minera Escondida, ubicada en el norte de Chile, es la operación minera de cobre más grande del mundo, gestionada por BHP. A principios de 2015, la empresa enfrentaba desafíos relacionados con los crecientes costos operativos, las emisiones significativas de gases de efecto invernadero y la necesidad de mejorar la calidad de su concentrado de cobre para competir en mercados internacionales. Entre las medidas adoptadas para abordar estos problemas, se implementaron hornos rotatorios para el secado del concentrado.

Detalles Significativos:

1. Reducción de emisiones de CO₂:

- Antes de la implementación, las emisiones de CO₂ alcanzaban niveles de 110 toneladas anuales debido al uso de métodos tradicionales. Con los hornos rotatorios, estas emisiones se redujeron a 33 toneladas, una disminución del **70%** (BHP, 2015).
- Este cambio fue posible gracias a la mayor eficiencia energética de los hornos rotatorios, que consumen menos energía por tonelada procesada y eliminan la quema de madera como fuente de calor.

2. Optimización del consumo energético:

- El método tradicional demandaba un promedio de **460 kWh/ton**, mientras que los hornos rotatorios lograron reducir el consumo a **240 kWh/ton**, generando ahorros energéticos de gran escala.

- Este cambio no solo impactó positivamente la sostenibilidad de la operación, sino que también redujo los costos asociados al consumo energético en un 45% (BHP, 2015).

3. Impacto en la productividad:

- La capacidad de los hornos para reducir los tiempos de secado de 8-12 horas a menos de 2 horas por lote permitió a Escondida aumentar su producción diaria. Esto fue crucial para responder a la demanda creciente en mercados internacionales (BHP, 2015).

4. Costos de inversión y retorno:

- La instalación de hornos rotatorios representó una inversión inicial de 30.770,35. Sin embargo, los ahorros combinados en energía y logística permitieron recuperar esta inversión en tan solo 4 años, un plazo considerado óptimo en operaciones de gran escala. (BHP, 2015).

Caso 2: División El Teniente (Codelco)

División El Teniente, operada por la Corporación Nacional del Cobre (Codelco), es la mina subterránea de cobre más grande del mundo. En 2018, la empresa decidió modernizar su proceso de secado de concentrado para mejorar la eficiencia operativa y garantizar el cumplimiento con normativas ambientales cada vez más estrictas. La implementación de hornos rotatorios fue una de las medidas clave adoptadas.

Detalles Significativos:

1. Uniformidad en la calidad del producto:

- Una de las principales limitaciones del método tradicional era la variabilidad en la humedad residual del concentrado, que fluctuaba entre un 7% y un 11%, afectando su valor en el mercado (Codelco, 2018).
- Con los hornos rotatorios, se logró una uniformidad en la humedad residual, manteniéndola en un rango estable del **8% al 9%**, lo que aumentó la aceptación del producto en mercados exigentes como Asia y Europa (Codelco, 2018).

2. Cumplimiento de normativas ambientales:

- La implementación permitió a El Teniente eliminar la quema de madera, una práctica que no solo generaba emisiones significativas de CO₂, sino que también producía cenizas y otros residuos sólidos difíciles de manejar (Codelco, 2018).

- Este cambio fue crucial para cumplir con las exigencias de la Ley Chilena de Emisiones Industriales, alineando a la empresa con estándares internacionales (Codelco, 2018).

3. Reducción de costos operativos:

- La eliminación de la madera como insumo redujo los costos asociados al transporte, almacenamiento y disposición de residuos en un **30%**.
- Además, los hornos rotatorios optimizaron el uso de energía, reduciendo los costos energéticos en un **15%**, lo que se tradujo en ahorros totales de 15.000 UF anuales (Codelco, 2018).

4. Impacto social y laboral:

- La transición tecnológica generó nuevas oportunidades laborales al requerir personal especializado para operar y mantener los hornos rotatorios. Esto permitió a la empresa capacitar a su fuerza laboral y mejorar las condiciones laborales al eliminar riesgos asociados al manejo de brasas y temperaturas extremas (Codelco, 2018).

Este caso ilustra cómo la tecnología no solo mejoró la eficiencia operativa y la sostenibilidad de El Teniente, sino que también fortaleció su reputación como líder en minería responsable.

Impacto Social y Ambiental

La implementación de hornos rotatorios en Cerro Negro no solo tiene implicaciones económicas, sino que también aborda desafíos sociales y ambientales, contribuyendo a un modelo de operación más sostenible y seguro.

Impacto Social:

1. Seguridad laboral mejorada:

- La eliminación del manejo de brasas y temperaturas extremas reduce significativamente los riesgos de accidentes, mejorando el bienestar de los trabajadores.
- Estas mejoras crean un entorno laboral más seguro y saludable, que incrementa la productividad y el compromiso de los empleados.

2. Capacitación y generación de empleos especializados:

- La transición a hornos rotatorios requiere personal técnico capacitado, generando nuevas oportunidades laborales y promoviendo el desarrollo de competencias en tecnologías avanzadas.

Impacto Ambiental:

1. Reducción de emisiones de CO₂:

- Con una disminución del 70%, las emisiones pasarán de 109.8 toneladas anuales a 32.9 toneladas anuales, alineándose con las metas climáticas de Chile y los estándares internacionales.

2. Conservación de recursos forestales:

- Al eliminar el consumo de madera, se promueven prácticas sostenibles que contribuyen a la preservación de ecosistemas locales y reducen los costos asociados al manejo de insumos.

3. Gestión eficiente de residuos:

- La eliminación de cenizas y otros desechos derivados de la combustión simplifica la logística y reduce el impacto ambiental de la operación.

La implementación de hornos rotatorios de calor directo representa un avance significativo en la modernización del proceso de secado de concentrado de cobre en la Compañía Minera Cerro Negro SA Este enfoque aborda de manera integral las limitaciones operativas, ambientales y competitivas identificadas previamente. Los siguientes puntos se desarrollan con mayor detalle las oportunidades de mejora y sus beneficios asociados.

Ahorros Anuales Proyectados

La implementación de hornos rotatorios genera importantes ahorros operativos. Estos ahorros provienen principalmente de la eficiencia energética, la reducción de costos logísticos y la eliminación del uso de madera.

Ahorro energético:

- En el método actual, se consume 450 kWh/tonelada de energía. Con una producción anual de 1.350 toneladas, el consumo energético total es de 450.000 kWh/año.
- Con los hornos rotatorios, el consumo de energía se reduce a 250 kWh/tonelada, lo que representa un total de 250.000 kWh/año.

Reducción de costos operativos:

- El método actual utiliza madera, lo que implica costos de adquisición, transporte, almacenamiento y disposición de residuos como cenizas. La eliminación de estos costos representa un ahorro de 2,88 UF/año.

Capítulo 3: Solución de Ingeniería

El secado del concentrado de cobre es una de las etapas más importantes y delicadas en las operaciones de la Compañía Minera Cerro Negro S.A. Este proceso asegura que el concentrado alcance los niveles de humedad requeridos para ser comercializado, pero su impacto va mucho más allá de eso. Afecta directamente la eficiencia de las operaciones diarias, los costos asociados al funcionamiento de la planta y la relación de la empresa con el medio ambiente. En su forma actual, el secado con brasas de madera plantea importantes desafíos que dificultan el trabajo, generan altos costos energéticos, aumentan las emisiones contaminantes y, en algunos casos, pueden comprometer la calidad del producto final.

Para enfrentar estos problemas, se ha propuesto implementar hornos rotatorios de calor directo como una solución innovadora. Esta tecnología tiene el potencial de transformar por completo el proceso de secado, haciéndolo más rápido, eficiente y respetuoso con el medio ambiente. Los hornos rotatorios no solo permitirán ahorrar energía y reducir significativamente las emisiones de carbono, sino que también eliminarán la dependencia de la madera, un recurso que no siempre es sostenible. Además, esta modernización ayudará a que Cerro Negro cumpla con regulaciones ambientales cada vez más exigentes, al mismo tiempo que fortalece su reputación como una empresa comprometida con la sostenibilidad.

En este capítulo, exploraremos a fondo cómo funcionará esta solución. Detallaremos el diseño técnico, los ajustes necesarios en la infraestructura actual y cómo se llevará a cabo la instalación de los nuevos equipos. También hablaremos de los beneficios esperados, no solo en términos de ahorro económico y reducción de emisiones, sino también en cómo esta innovación permitirá a la empresa operar de manera más fluida y alineada con las demandas del mercado global. Este proyecto no solo busca ser técnicamente viable y económicamente factible, sino también un paso hacia una operación minera más responsable y comprometida con el futuro.

Alcance del Proyecto

La Compañía Minera Cerro Negro S.A. está lista para dar un paso decisivo hacia la modernización y la sostenibilidad con este proyecto, que busca transformar por completo su sistema actual de secado de concentrado de cobre. Hoy en día, este proceso se basa en el uso de brasas de madera, un método que, aunque fue útil en el pasado, ya no responde a las necesidades actuales de eficiencia, sostenibilidad y seguridad laboral. La implementación de hornos rotatorios de calor directo no solo resolverá las limitaciones técnicas y ambientales del método actual, sino que también posicionará a Cerro Negro como un referente en prácticas responsables dentro de la industria minera.

Este proyecto va más allá de la incorporación de una nueva tecnología; se trata de sentar las bases para un futuro más eficiente, competitivo y alineado con las exigencias ambientales actuales. Al centrarse en aspectos clave como la reducción de emisiones, la optimización del tiempo y la mejora de las condiciones laborales, Cerro Negro no solo mejorará sus operaciones internas, sino que también reforzará su reputación como líder en el sector.

Objetivos del Proyecto

El alcance de este proyecto se articula en torno a tres grandes objetivos, diseñados para abordar las necesidades más urgentes de la operación y generar beneficios tangibles tanto para la empresa como para el medio ambiente.

Sustitución del método de secado actual:

- El primer paso es eliminar completamente el uso de madera como fuente de calor. Este cambio tendrá un impacto directo en la reducción de emisiones de CO₂, disminuyéndolas en un 70%, lo que equivale a aproximadamente 76.9 toneladas anuales. Este avance no solo contribuirá al cumplimiento de metas ambientales, sino que también tendrá un efecto positivo en la percepción pública de la empresa como un actor comprometido con la sostenibilidad.
- Además, eliminar el manejo de brasas y temperaturas extremas mejorará significativamente las condiciones de trabajo para los operadores, reduciendo riesgos y fortaleciendo la seguridad laboral, un aspecto prioritario en cualquier operación minera.

Optimización del proceso:

- La tecnología de hornos rotatorios permitirá reducir los tiempos de secado de 6-12 horas por lote a 1-2 horas, lo que representa una mejora enorme en términos de eficiencia operativa. Este cambio no solo permitirá procesar más concentrado en menos tiempo, sino que también garantizará un flujo continuo en la producción, eliminando cuellos de botella que actualmente afectan la operación.
- Según datos de expertos del sector, como Metso (2018), esta reducción en los tiempos no solo mejora la productividad, sino que también incrementa la rentabilidad de las operaciones al reducir costos asociados al consumo energético y al mantenimiento de los equipos.

Cumplimiento normativo:

- Este proyecto también asegura que Cerro Negro se alinee con las regulaciones ambientales más estrictas, como la Ley Chilena de Emisiones Industriales, que exige límites claros para las emisiones generadas por procesos industriales.
- Además, la reducción de emisiones de CO₂ contribuye directamente a las metas climáticas establecidas por el Acuerdo de París, mostrando el compromiso de la empresa con la sostenibilidad global. Este cumplimiento no solo evitará posibles sanciones regulatorias, sino que también abrirá puertas a nuevos mercados internacionales, donde los estándares ambientales son cada vez más valorados.

El impacto del proyecto

La importancia de este proyecto no radica solo en los beneficios técnicos que traerá, sino también en su capacidad para transformar la operación en una más eficiente, sostenible y orientada al futuro.

En términos operativos:

- La reducción de los tiempos de secado permitirá a la planta manejar un mayor volumen de producción diaria, maximizando el uso de los recursos disponibles sin necesidad de grandes inversiones adicionales.
- Además, los hornos rotatorios permitirán un secado más uniforme, lo que mejorará la calidad del producto final, asegurando que cumpla con los estándares exigidos por los mercados más competitivos.

Desde la perspectiva económica:

- Al reducir el consumo energético de 450 kWh/ton a 250 kWh/ton, el proyecto generará ahorros anuales estimados en 615,41 UF solo en costos energéticos. Este ahorro es particularmente importante en un contexto donde la eficiencia económica es clave para mantener la competitividad en el mercado global.

En el ámbito ambiental:

- El impacto ambiental positivo será significativo, con una reducción de emisiones de CO₂ de 76.9 toneladas anuales y la eliminación del uso de madera como fuente de calor, contribuyendo a la conservación de recursos forestales y promoviendo prácticas sostenibles.

Este proyecto marca un antes y un después para Cerro Negro, permitiéndole no solo superar las limitaciones del sistema actual, sino también posicionarse como un líder en sostenibilidad dentro de la industria minera. En los próximos apartados, se detallará cómo este alcance se materializará a través de un diseño técnico robusto, un plan de implementación estructurado y un sistema de monitoreo continuo para garantizar que cada objetivo se cumpla de manera eficiente.

Alcance técnico

La Compañía Minera Cerro Negro S.A. está lista para dar un paso decisivo hacia la modernización y la sostenibilidad con este proyecto, que busca transformar por completo su sistema actual de secado de concentrado de cobre. Hoy en día, este proceso se basa en el uso de brasas de madera, un método que, aunque fue útil en el pasado, ya no responde a las necesidades actuales de eficiencia, sostenibilidad y seguridad laboral. La implementación de hornos rotatorios de calor directo no solo resolverá las limitaciones técnicas y ambientales del método actual, sino que también posicionará a Cerro Negro como un referente en prácticas responsables dentro de la industria minera.

Este proyecto va más allá de la incorporación de una nueva tecnología; se trata de sentar las bases para un futuro más eficiente, competitivo y alineado con las exigencias

ambientales actuales. Al centrarse en aspectos clave como la reducción de emisiones, la optimización del tiempo y la mejora de las condiciones laborales, Cerro Negro no solo mejorará sus operaciones internas, sino que también reforzará su reputación como líder en el sector.

Estrategia de Implementación y Análisis de Riesgos

La implementación de los hornos rotatorios se llevará a cabo en varias etapas cuidadosamente planificadas para minimizar el impacto en las operaciones actuales de la planta. La estrategia de implementación incluye:

Evaluación inicial de instalaciones:

- Identificar los ajustes necesarios en la infraestructura existente, incluyendo obras civiles, conexiones eléctricas y sistemas de ventilación.
- Coordinar con los equipos de operaciones para determinar los periodos de menor impacto para realizar las modificaciones necesarias.

Mitigación de interrupciones:

- Planificar la instalación de los hornos por etapas para asegurar que al menos una parte de la producción pueda continuar operando durante el proceso.
- Diseñar un plan de contingencia para manejar cualquier posible interrupción no planificada durante la transición.

Capacitación previa del personal:

- Antes de la instalación, el personal clave recibirá capacitación teórica y práctica sobre el funcionamiento y mantenimiento de los nuevos hornos, asegurando una transición sin problemas.

Pruebas y validación inicial:

- Una vez instalados, los hornos serán sometidos a pruebas exhaustivas para calibrar su funcionamiento y asegurar que cumplen con los parámetros de diseño.

Los riesgos potenciales identificados incluyen:

- **Interrupciones temporales de la producción:** Mitigadas mediante una implementación escalonada.
- **Problemas técnicos en la instalación:** Reducidos al seleccionar proveedores confiables con experiencia en proyectos similares.
- **Resistencia al cambio por parte del personal:** Abordada mediante capacitación y comunicación constante sobre los beneficios del proyecto.

Evaluación y Seguimiento del Proyecto

Para garantizar que el proyecto cumpla con sus objetivos, se implementará un sistema de evaluación basado en indicadores clave de desempeño (KPI). Estos KPI medirán:

Eficiencia operativa:

- **Tiempos de secado:** Verificar la reducción de 6-12 horas a 1-2 horas por lote.
- **Volumen de producción:** Monitorear el incremento en la capacidad diaria y mensual.

Impacto ambiental:

- **Emisiones de CO₂:** Confirmar la reducción proyectada del 70% (76.9 toneladas anuales).
- **Eliminación del uso de madera:** Validar la transición completa hacia el uso exclusivo de energía eléctrica.

Ahorros económicos:

- **Consumo energético:** Evaluar la disminución de 450 kWh/ton a 250 kWh/ton.
- **Reducción de costos:** Confirmar el ahorro anual de 615,42 UF.

Satisfacción del personal:

- Realizar encuestas posteriores a la capacitación y durante la operación para evaluar la aceptación y la confianza del personal en la nueva tecnología.

Un sistema de monitoreo continuo recogerá estos datos y permitirá realizar ajustes en tiempo real para maximizar el rendimiento del proyecto.

Diseño de la Solución Propuesta

El diseño de esta solución tecnológica ha sido cuidadosamente planificado para adaptarse a las características específicas de Cerro Negro. Los hornos rotatorios no solo reemplacen al método actual, sino que también integren tecnología avanzada que simplifique el trabajo diario y mejore los resultados operativos. Además de optimizar los tiempos de secado, estos hornos mejoran la calidad del concentrado al asegurar un secado uniforme que elimina variaciones de humedad, reduciendo defectos en el producto final y asegurando un contenido de humedad homogéneo que cumple con los estrictos estándares de mercados internacionales. Esto incrementa la competitividad y el valor comercial del concentrado.

Especificaciones técnicas

Capacidad operativa:

- Cada horno rotatorio tiene la capacidad de procesar 1350 toneladas al mes, lo que significa que, entre ambos, podrán cubrir la producción actual con suficiente margen para responder a aumentos futuros en la demanda. Además, los hornos contribuirán a mejorar la calidad del concentrado, al mantener un secado uniforme que reduce el contenido de humedad residual al rango ideal de 8%-9%, optimizando su valor comercial.

Eficiencia energética:

- Los hornos consumen 250 kWh por tonelada procesada, lo que representa un ahorro energético del 44% frente al método tradicional. En términos prácticos, esto equivale a un ahorro de 200,000 kWh al año, lo que no solo reduce los costos de operación en aproximadamente 615,42 UF, sino que también disminuye la huella de carbono de la operación.

Control de calidad:

- Los hornos estarán equipados con sensores de última generación que monitorean en tiempo real la humedad y la temperatura del concentrado. Esto garantiza que cada lote se seque de manera uniforme, manteniendo un contenido de humedad residual entre 8%-9%, lo cual es ideal para la comercialización del producto en mercados exigentes.

Infraestructura requerida

Obras civiles:

- La instalación de los hornos requerirá la construcción de bases sólidas y estables capaces de soportar tanto el peso como las vibraciones del equipo. Además, se implementarán sistemas de ventilación especializados para manejar de manera segura los gases generados durante el secado, cumpliendo con las regulaciones ambientales.

Conexiones eléctricas:

- Se diseñará una infraestructura eléctrica que soporte la operación continua de los hornos, incluyendo sistemas de protección para evitar fallos eléctricos y garantizar una alimentación estable. Este diseño considerará redundancia eléctrica para evitar interrupciones y asegurar que la operación pueda mantenerse en caso de fallos en el suministro principal.

Diseño de la Solución Propuesta

El diseño de esta solución tecnológica ha sido cuidadosamente planificado para adaptarse a las características específicas de Cerro Negro. La idea es que los hornos rotatorios no solo reemplacen al método actual, sino que también integren tecnología avanzada que simplifique el trabajo diario y mejore los resultados operativos.

Especificaciones técnicas

Capacidad operativa:

- Cada horno rotatorio tiene la capacidad de procesar 1350 toneladas al mes, lo que significa que, entre ambos, podrán cubrir la producción actual con suficiente margen para responder a aumentos futuros en la demanda. Este nivel de capacidad no solo asegura el flujo operativo, sino que también otorga flexibilidad para enfrentar desafíos imprevistos.

Eficiencia energética:

- Los hornos consumen 250 kWh por tonelada procesada, lo que representa un ahorro energético del 44% frente al método tradicional. En términos prácticos, esto equivale a un ahorro de 200,000 kWh al año, lo que no solo reduce los costos de operación en aproximadamente 615,42 UF, sino que también disminuye la huella de carbono de la operación.

Control de calidad:

- Los hornos estarán equipados con sensores de última generación que monitorean en tiempo real la humedad y la temperatura del concentrado. Esto garantiza que cada lote se seque de manera uniforme, manteniendo un contenido de humedad residual entre 8%-9%, lo cual es ideal para la comercialización del producto en mercados exigentes.

Infraestructura requerida

Obras civiles:

- Para instalar los hornos, será necesario construir bases sólidas y estables que soporten tanto el peso como las vibraciones del equipo. También se implementarán sistemas de ventilación que manejarán de manera segura los gases generados durante el secado, cuidando tanto el medio ambiente como el entorno de trabajo.

Conexiones eléctricas:

- Se diseñará una infraestructura eléctrica que soporte la operación continua de los hornos. Esto incluirá sistemas de protección para evitar fallos y asegurar una energía estable durante las jornadas de trabajo.

Software de monitoreo:

- Este sistema será una pieza clave en la operación, ya que permitirá ajustar automáticamente los parámetros según las necesidades del momento y detectar cualquier anomalía antes de que afecte la producción. Esto no solo mejorará la eficiencia, sino que también reducirá costos de mantenimiento.

Impacto en las operaciones

La incorporación de esta tecnología marcará una diferencia significativa en las operaciones diarias:

- **Productividad mejorada:** Los hornos permitirán secar más concentrado en menos tiempo, eliminando los cuellos de botella que actualmente ralentizan el proceso.
- **Menores costos operativos:** Al reducir el consumo de energía y eliminar el uso de madera, la empresa podrá destinar esos recursos a otras áreas estratégicas.
- **Calidad constante:** Un secado más uniforme garantizará un concentrado que cumpla con los estándares internacionales, fortaleciendo la competitividad de Cerro Negro.

Etapas de Implementación

La implementación de los hornos rotatorios se llevará a cabo en varias etapas, asegurando que cada fase se complete de manera eficiente y con el menor impacto posible en las operaciones actuales.

Etapas de Implementación

Levantamiento de necesidades:

- En esta fase inicial, se evaluarán las instalaciones actuales para identificar las modificaciones necesarias. También se seleccionarán los proveedores de los hornos, priorizando la calidad y la experiencia en proyectos similares.

Gestión financiera:

- Se asignarán los recursos necesarios para cubrir los costos de adquisición, instalación y capacitación, asegurando que el proyecto tenga una base financiera sólida.

Diseño del cronograma:

- Se elaborará un plan detallado que permita coordinar cada actividad sin interrumpir las operaciones diarias de la planta.

Etapa 2: Adquisición de equipos

Selección de proveedores:

Se buscarán empresas reconocidas como CITIC Heavy Industries, Emison, Hongxing, Hongji Mine Machinery, Alibaba.com, FTM Machinery, entre otros que ofrezcan tecnología confiable y soporte técnico adecuado. **Logística:**

- Se coordinará el transporte de los equipos para garantizar que lleguen a tiempo y en perfectas condiciones.

Etapa 3: Instalación y pruebas

Adaptaciones en las instalaciones:

- Se realizarán las modificaciones necesarias para acomodar los hornos, incluyendo ajustes eléctricos y estructurales.

Pruebas operativas:

- Una vez instalados, se realizarán pruebas exhaustivas para calibrar los parámetros y garantizar que los hornos funcionen de manera óptima.

Etapa 4: Capacitación y puesta en marcha

Capacitación del personal:

- Los operadores recibirán formación teórica y práctica para asegurar que puedan manejar los hornos de manera eficiente y segura.

Monitoreo inicial:

- Durante los primeros seis meses, se supervisará de cerca la operación para identificar cualquier problema y ajustarlo rápidamente.

Beneficios Esperados

Este proyecto promete beneficios claros y significativos que impactarán tanto las operaciones como el entorno en el que trabaja Cerro Negro.

Operativos:

- La reducción de los tiempos de secado a 1.5 horas por lote permitirá procesar más material en menos tiempo, aumentando la capacidad diaria de producción.

Ambientales:

- Con una reducción del 70% en las emisiones de CO₂ y la eliminación del uso de madera, Cerro Negro no solo mejorará su desempeño ambiental, sino que también contribuirá al cuidado de los recursos naturales.

Económicos:

- Se proyecta un ahorro energético de 200,000 kWh anuales, lo que equivale a 615,41 UF. Además, la inversión inicial de 15.000 UF se recuperará en 8.33 años, lo que asegura una rentabilidad sostenible a largo plazo.

Con esta modernización, Cerro Negro no solo optimizará su proceso de secado, sino que también fortalecerá su posición como líder en sostenibilidad dentro del sector minero.

Selección y Evaluación del Horno Rotatorio Adecuado

Para optimizar el proceso de secado del concentrado de cobre, mejorar la eficiencia energética y reducir emisiones, es fundamental la elección de un horno rotatorio que se adapte a las necesidades específicas de la Compañía Minera Cerro Negro S.A. En esta sección se evalúan tres alternativas existentes en el mercado, considerando su capacidad, eficiencia, costos, sostenibilidad y facilidad de integración.

1 Alternativas Evaluadas

Alternativa A: Horno Rotatorio EMISON

- **Descripción:** Hornos rotatorios fabricados a medida, con un control preciso de temperatura y alto grado de aislamiento térmico. Emison es una empresa reconocida por su capacidad de adaptar el diseño a los requerimientos del cliente, asegurando eficiencia energética y calidad del producto final (EMISON, s.f.).
- **Especificaciones Técnicas:**
 - Diseño personalizado según la capacidad requerida (ej. 1.350 ton/mes).
 - Control electrónico avanzado de temperatura y humedad.
 - Alto aislamiento térmico, reduciendo pérdidas energéticas.
- **Eficiencia:** Alta, gracias al control preciso y la adaptabilidad del equipo.
- **Costo Estimado:** ~5.128,39 – 6410,49 UF.
- **Ventajas:** Ajuste exacto a la demanda, eficiencia energética, reducción de emisiones y mejor calidad del concentrado.

Desventaja: El tiempo de entrega podría ser mayor debido a la fabricación a medida.

Alternativa B: Horno Rotatorio CITIC HIC

- **Descripción:** Horno rotatorio de gran escala, común en la industria del cemento y la minería de alta producción. Diseñado para grandes volúmenes, superando con creces las necesidades actuales de Cerro Negro.

- **Especificaciones Técnicas:**
 - Capacidades superiores a 10.000 ton/día.
 - Estructura robusta, apta para producción continua de gran magnitud.
- **Eficiencia:** Muy alta en operaciones masivas, pero sobredimensionada para la escala presente.
- **Costo Estimado:** ~20.513,57 – 30.770,35 UF, debido al tamaño y complejidad del equipo.
- **Ventajas:** Ideal para expansiones futuras y gran robustez.

Desventajas: Sobreinversión, capacidad excedente, mayor complejidad y costos.

Alternativa C: Horno Rotatorio FTM Machinery

- **Descripción:** Hornos rotatorios versátiles y estandarizados, con una gama amplia de capacidades. Menos flexibles que EMISON, pero más adaptables que CITIC (Fote Machinery, s.f.).
- **Especificaciones Técnicas:**
 - Capacidades desde unas pocas centenas hasta varios miles de toneladas.
 - Carcasa de acero, revestimiento refractario y controles automatizados básicos.
- **Eficiencia:** Buena, pero no optimizada al 100% para el consumo energético específico de la faena.
- **Costo Estimado:** ~7.692,59 – 10.256,78 UF, según opciones y capacidad elegida.
- **Ventajas:** Flexibilidad dentro de rangos estándar, lead time de entrega razonable.

Desventajas: No totalmente a medida, posiblemente requiera ajustes operativos adicionales.

Tabla Comparativa de las Alternativas

Característica	EMISON	CITIC HIC	FTM Machinery
Capacidad Ajustada	Sí (a medida)	No (diseñado para gran escala)	Parcial (modelos estándar)
Control Preciso de Temperatura	Alto	Alto (pero sobredimensionado)	Medio (configuraciones limitadas)
Eficiencia Energética	Alta	Alta en gran escala	Buena (no totalmente optimizada)
Costo Estimado (UF)	5.128,39 – 6.410,49	20.513,57 – 30.770,35	7.692,59 – 10.256,78
Tiempo de Entrega	Medio (a medida)	Largo (equipo de gran tamaño)	Medio (modelos estándar)
Adaptabilidad a Necesidades	Alta	Baja	Media
Complejidad de Operación	Media	Alta	Media
Compatibilidad Sostenible	Alta	Alta, pero ineficiente a pequeña escala	Buena, pero con menor precisión

Tabla 3 Comparación de alternativas

Fuente 14 Elaboración propia para el proyecto

Selección de la Alternativa más Adecuada

Tras analizar las necesidades de la Compañía Minera Cerro Negro S.A. La reducción del tiempo de secado, control preciso de las variables de operación, eficiencia energética, reducción de emisiones y un costo adecuado a la escala de producción, la Alternativa A (Horno Rotatorio EMISON) se destaca como la más conveniente.

Criterios:

Personalización del Equipo: Permite adaptar la capacidad y especificaciones exactamente a la operación de Cerro Negro, evitando sobredimensionar la inversión y maximizando la eficiencia operativa.

Eficiencia Energética y Control de Proceso: El control electrónico avanzado y el alto aislamiento contribuyen a reducir el consumo de energía, disminuir las emisiones de CO₂ y asegurar un secado uniforme del concentrado.

Relación Costo-Beneficio Adecuada: Aunque no es la opción más económica en términos absolutos, su costo está más alineado con la escala del proyecto que las demás alternativas, garantizando un retorno de la inversión en un plazo razonable.

Cumplimiento de Objetivos Ambientales: La menor huella de carbono y el mejor aprovechamiento de recursos apoyan las metas de sostenibilidad y responsabilidad ambiental de la empresa.

La elección del horno rotatorio EMISON refuerza la solución de ingeniería planteada, asegurando una implementación alineada con los objetivos de eficiencia, sostenibilidad y competitividad de la Compañía Minera Cerro Negro S.A. De este modo, se garantiza que la transición a los nuevos hornos rotatorios aporte valor a la operación, reduzca costos a largo plazo y mejore la calidad del producto final.

Cronograma Global

El cronograma global del proyecto detalla las etapas clave y las fechas asociadas para la implementación de los hornos rotatorios en la Compañía Minera Cerro Negro S.A. Este cronograma está diseñado para garantizar una transición eficiente y minimizar interrupciones en las operaciones existentes.

Resumen de Fases del Proyecto

Tarea	Inicio	Duración (días)	Fin
Levantamiento de Necesidades	01-01-2025	30	30-01-2025
Gestión Financiera	31-01-2025	20	19-02-2025
Diseño del Cronograma	20-02-2025	15	06-03-2025
Adquisición de equipos	06-03-2025	40	14-04-2025
Adaptaciones en las instalaciones	16-04-2025	60	14-06-2025
Pruebas operativas	16-06-2025	30	15-07-2025
Capacitación del personal	16-07-2025	20	04-08-2025
Monitoreo inicial	05-08-2025	180	31-01-2026

Tabla 4: Fases del proyecto

Fuente 15 Elaboración propia para el proyecto

2 Visualización del Cronograma

El cronograma global puede representarse mediante una carta Gantt para visualizar las dependencias entre fases y los tiempos estimados para cada etapa.

- **Inicio del Proyecto:** 01/01/2024.
- **Duración Total:** Aproximadamente 13 meses.

3 Detalles por Fase

Levantamiento de Necesidades:

- Incluye la identificación de requisitos técnicos, logísticos y presupuestarios.

Gestión Financiera:

- Consiste en la obtención de fondos necesarios y la aprobación de presupuesto por parte de la dirección.

Diseño del Cronograma:

- Elaboración de un plan detallado con tareas y plazos para cada actividad.

Adquisición de Equipos:

Selección y compra de los hornos rotatorios y sus componentes.

Adaptaciones en las Instalaciones:

- Preparación del sitio, construcción de bases y conexión de servicios auxiliares.

Pruebas Operativas:

- Validación de los equipos instalados, asegurando su correcto funcionamiento antes de la operación.

Capacitación del Personal:

- Entrenamiento del equipo operativo en el uso y mantenimiento de los nuevos hornos.

Monitoreo Inicial:

- Supervisión intensiva para ajustar parámetros y resolver problemas durante los primeros seis meses de operación.

Impacto del Cronograma

- Este cronograma asegura una implementación controlada que minimiza riesgos y asegura el éxito del proyecto. Cada fase está diseñada para lograr hitos clave, garantizando la sostenibilidad operativa y el cumplimiento de los objetivos establecidos.

Carta Gantt

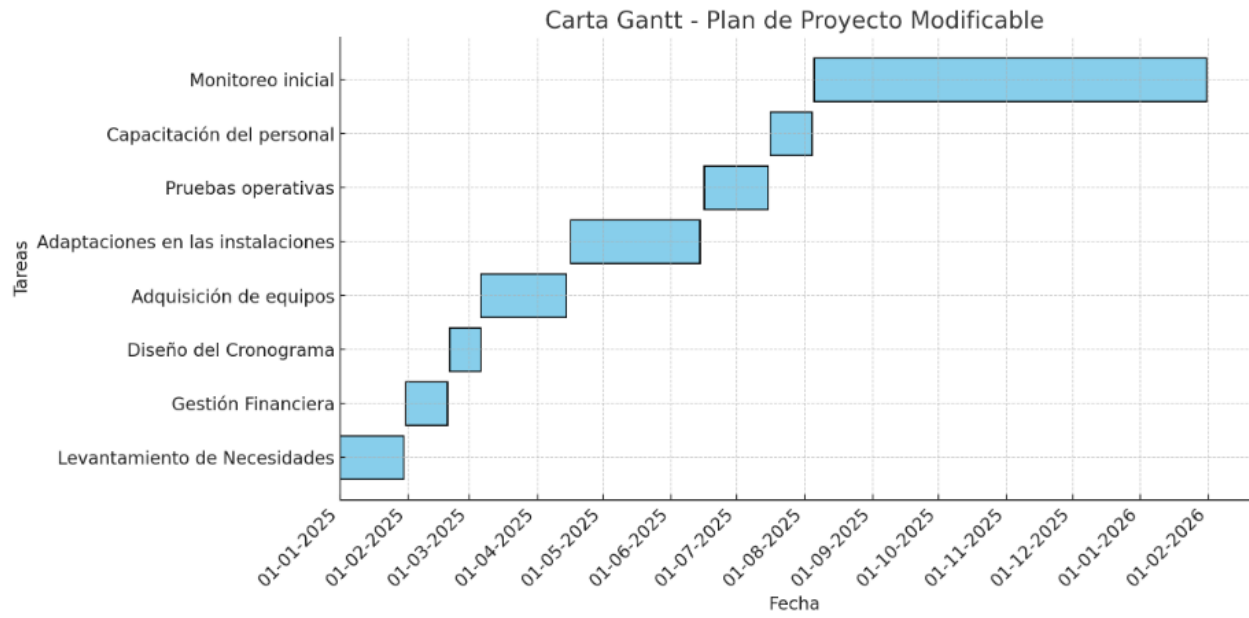


Ilustración 7: Carta Gantt

Fuente 16 Elaboración propia para el proyecto

CAPÍTULO 4: ESTUDIO ECONÓMICO

En el marco de la mejora continua de los procesos productivos, el presente capítulo aborda un análisis económico detallado para evaluar la viabilidad y los beneficios financieros asociados con la implementación de hornos rotatorios de alta eficiencia en la Compañía Minera Cerro Negro S.A. Este análisis es fundamental para sustentar la transición hacia una tecnología que promete resolver las ineficiencias actuales del proceso de secado de concentrado de cobre, realizado tradicionalmente con planchas de leña.

El contexto de este estudio se fundamenta en la necesidad de optimizar un proceso que, aunque funcional, presenta importantes limitaciones en términos de eficiencia operativa, costos energéticos y sostenibilidad ambiental. Estas deficiencias no solo impactan negativamente en la calidad y consistencia del producto final, sino que también generan altos costos operativos y contribuyen significativamente a la huella ambiental de la empresa. En este sentido, el capítulo desglosa los antecedentes, los supuestos adoptados y la estructura de costos asociados a la implementación de esta nueva tecnología.

ANTECEDENTES GENERALES Y SUPUESTOS DEL PROYECTO

Antecedentes y Supuestos

La Compañía Minera Cerro Negro S.A. enfrenta un desafío significativo en la optimización del proceso de secado de concentrado de cobre, actualmente realizado mediante planchas de leña. Este método genera ineficiencias operativas, altos costos energéticos y un impacto ambiental considerable. A pesar de su uso prolongado como una técnica tradicional en la industria minera, este enfoque se ha quedado atrás frente a las demandas actuales de eficiencia y sostenibilidad. Los tiempos prolongados de secado y la variabilidad en la calidad del producto final son solo algunos de los problemas más notorios asociados con este método. Además, el uso intensivo de leña como combustible contribuye a un impacto ambiental negativo, incluyendo altas emisiones de CO₂ y un significativo consumo de recursos naturales.

La implementación de hornos rotatorios de alta eficiencia promete resolver estas limitaciones de manera integral. Esta tecnología avanzada no solo aborda las ineficiencias operativas, sino que también reduce significativamente los costos energéticos al disminuir el consumo por tonelada procesada. Por otro lado, permite un control más preciso de la temperatura y la humedad, garantizando así una mayor uniformidad en el contenido de humedad del concentrado de cobre. Esto no solo mejora la calidad del producto final, haciéndolo más competitivo en el mercado global, sino que también genera una reducción considerable en los rechazos de producto debido a inconsistencias en sus propiedades.

Además de los beneficios operativos, los hornos rotatorios también tienen un impacto ambiental positivo. Al eliminar el uso de leña, se reduce la deforestación y se contribuye a la conservación de los recursos forestales. Asimismo, las emisiones de CO₂ se reducen significativamente, alineándose con los compromisos de la empresa hacia la

sostenibilidad y el cumplimiento normativo en materia ambiental. Esto posiciona a Cerro Negro como un líder en la adopción de tecnologías limpias dentro del sector minero.

La transición hacia esta tecnología representa una inversión estratégica para la empresa, tanto desde el punto de vista financiero como reputacional. En un mercado cada vez más exigente, la capacidad de reducir costos operativos mientras se mejora la calidad del producto es clave para mantener la competitividad. Además, la reducción del impacto ambiental fortalece la imagen de la empresa como un actor responsable y comprometido con el desarrollo sostenible, lo que puede abrir nuevas oportunidades de mercado y mejorar las relaciones con las comunidades locales. Por lo tanto, la implementación de los hornos rotatorios no solo resolverá los problemas actuales, sino que también sentará las bases para un futuro más eficiente y sostenible para Cerro Negro.

Supuestos del análisis actualizado:

- a. **Producción actualizada:** 1,350 toneladas mensuales.
- b. **Costo de energía actual por tonelada:** 450 kWh/ton.
- c. **Nuevo costo de energía por tonelada:** 250 kWh/ton.
- d. **Costo por kWh:** 3 UF.
- e. **Inversión inicial del proyecto:** 15,000 UF.
- f. **Ahorro operativo anual:** Actualizado a 3,240 UF.
- g. **Vida útil proyectada de los hornos:** 10 años.
- h. **Tasa de descuento:** 8% anual.

Estructura de Costos

La implementación de hornos rotatorios de alta eficiencia representa una oportunidad clave para optimizar los costos asociados al proceso de secado del concentrado de cobre. Este análisis desglosa tanto los costos iniciales como los operativos actuales y proyectados, destacando los ahorros significativos que se pueden alcanzar con esta tecnología.

La implementación de hornos rotatorios representa una inversión clave para reducir los costos operativos asociados al proceso de secado. Con el ajuste a 1,350 toneladas mensuales, los costos se calculan de la siguiente manera:

Costos Iniciales:

- Adquisición de hornos rotatorios: 12.000 UF.
- Obras civiles y adecuaciones: 2.100 UF.
- Capacitación del personal y pruebas iniciales: 900 UF.

- **Total de Inversión Inicial:** 15.000 UF.

Costos Operativos Actuales:

- Energía anual:
 - Consumo actual: .
 - Consumo proyectado: .
 - **Ahorro anual en energía:** 6.120 UF.

Costos Operativos Reducidos:

- Eliminación de uso de leña: 1.200 UF.
- Ahorro en mantención: 300 UF.
- **Ahorro Total Anual:** 3.240 UF.

Categoría	Detalle	Costo (UF)
Inversión Inicial	Adquisición de hornos	12,000
	Obras civiles y adecuaciones	2,100
	Capacitación del personal	900
	Total	15,000
Operativos Actuales	Consumo de energía actual	21,870
Operativos Proyectados	Consumo de energía proyectado	15,750
Ahorros Proyectados	Ahorro anual en energía	6,120
	Eliminación de uso de leña	1,200
	Ahorro en mantención	300
	Ahorro Total Anual	3,240

Tabla 5: Resumen de costos

Fuente 17 Elaboración propia para el proyecto

Comparación de Costos Operativos Actuales y Proyectados

El siguiente gráfico ilustra la reducción significativa en los costos operativos con la implementación de los hornos rotatorios:

- **Costos Actuales:** Representan el consumo de energía actual (16,374 UF/año).
- **Costos Proyectados:** Representan el consumo de energía proyectado (13,500 UF/año), junto con los ahorros adicionales por la eliminación del uso de leña y la reducción en costos de mantención.

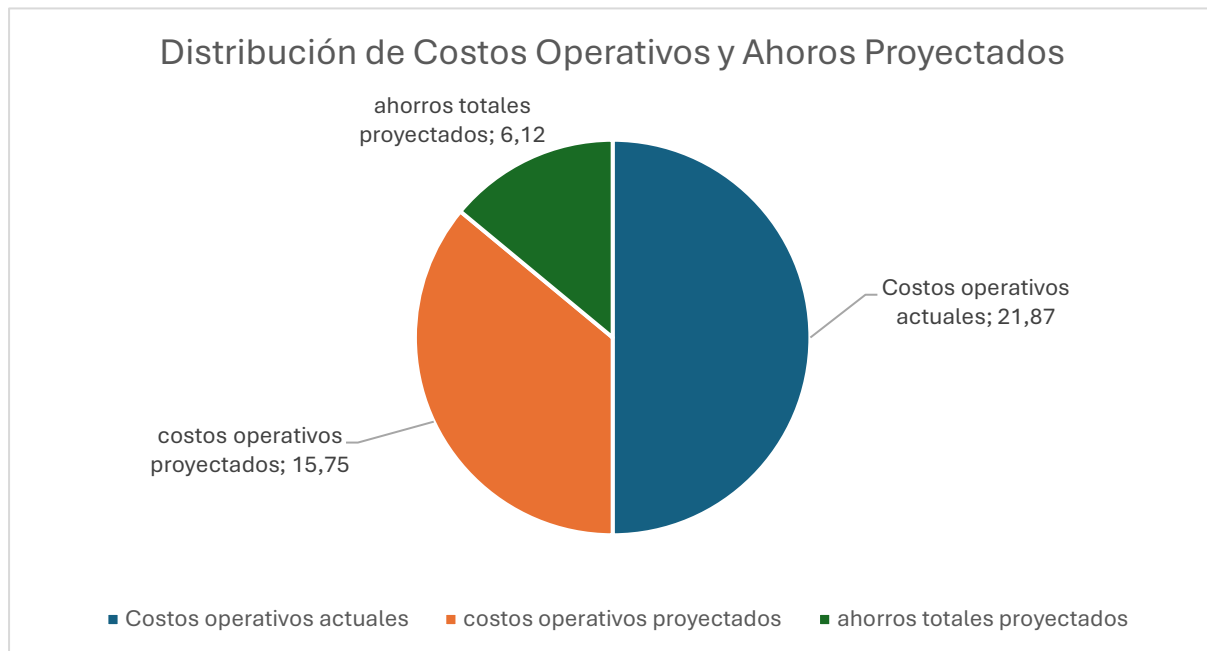


Gráfico 5 Distribución de Costos Operativos y Ahorros Proyectados

Fuente 18 Elaboración propia para el proyecto

Resumen de Costos

El análisis actualizado, enfocado en una producción mensual de 1,350 toneladas, evidencia los beneficios financieros y operativos que ofrece la implementación de hornos rotatorios de alta eficiencia. Este proyecto no solo optimiza los recursos energéticos, sino que también refuerza el compromiso de Cerro Negro con la sostenibilidad y la innovación tecnológica, clave para mantenerse competitivo en un entorno minero cada vez más exigente.

Desde el punto de vista financiero, el proyecto se presenta como una inversión estratégica capaz de equilibrar la reducción de costos operativos con un aumento en la eficiencia productiva. A lo largo de su vida útil proyectada, los ahorros acumulados fortalecen la rentabilidad del proyecto y aseguran un impacto positivo en los resultados económicos de la empresa.

Concepto	Costo (UF)
Inversión Inicial	15,000
Ahorro Anual Total	3,240
Tiempo de Recuperación (Payback)	4.63 años
Retorno de la Inversión (ROI)	20% en 10 años

Tabla 6 Resumen de costos

Fuente 19 elaboración Propia para el proyecto

Cálculos:

1. Payback (Tiempo de Recuperación):

$$\text{Payback} = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Ahorro Mensual}}$$

$$\text{Payback} = \frac{15,000 \text{ UF}}{1,800 \text{ UF/año}} = 8.33 \text{ años}$$

2. Retorno de la Inversión (ROI):

$$\text{ROI} = \left(\frac{\text{Ahorro Total Acumulado} - \text{Inversión Inicial}}{\text{Inversión Inicial}} \right) \times 100$$

Sustitución en la fórmula del ROI:

$$\text{ROI} = \left(\frac{18,000 \text{ UF} - 15,000 \text{ UF}}{15,000 \text{ UF}} \right) \times 100$$

$$\text{ROI} = \left(\frac{3,000 \text{ UF}}{15,000 \text{ UF}} \right) \times 100 = 20\%$$

Cálculo del Ahorro Total Acumulado:

$$\text{Ahorro Total Acumulado} = \text{Ahorro Anual Total} \times \text{Vida Útil en Años}$$

$$\text{Ahorro Total Acumulado} = 1,800 \frac{\text{UF}}{\text{año}} \times 10 \text{ años} = 1,800 \text{ UF}$$

Métricas de Ahorro

En esta sección se analizan y cuantifican las métricas clave de ahorro obtenidas mediante la implementación de los hornos rotatorios de alta eficiencia. Estas métricas, que incluyen el margen de ahorro energético y el margen de ahorro total, son fundamentales para evaluar el impacto del proyecto en términos de sostenibilidad y rentabilidad operativa. A continuación, se presentan las fórmulas, cálculos y visualizaciones correspondientes.

Margen de Ahorro Energético:

Esta métrica mide el porcentaje de ahorro energético logrado con respecto al consumo energético actual

Formula:

$$\text{Margen de Ahorro Energético (\%)} = \frac{\text{Ahorro Energético Proyectado}}{\text{Consumo Energético Actual}} \times 100$$

Cálculo:

- **Consumo Energético Actual:**

$$1,350 \text{ ton/mes} \times 12 \text{ meses} \times 450 \text{ kWh/ton} = 7,290,000 \text{ kWh/año}$$

Consumo Energético Proyectado:

$$1,350 \text{ ton/mes} \times 12 \text{ meses} \times 250 \text{ kWh/ton} = 4,050,000 \text{ kWh/año}$$

Ahorro Energético Proyectado:

$$7,290,000 \text{ kWh/año} - 4,050,000 \text{ kWh/año} = 3,240,000 \text{ kWh/año}$$

Margen de Ahorro Energético:

$$\text{Margen Energético} = \frac{3,240,000}{7,290,000} \times 100 = 44.44\%$$

Margen de Ahorro Total:

Esta métrica mide el porcentaje de ahorro total (energético y operativo) con respecto a los costos actuales.

Fórmula:

$$\text{Margen de Ahorro Total (\%)} = \frac{\text{Ahorro Total Anual}}{\text{Costo Operativo Actual}} \times 100$$

Calculo:

- Costo Operativo Actual (Energía)

$$7,290,200 \text{ kWh/año} \times 3 \text{ UF / kWh} = 21,870.6 \text{ UF/año.}$$

Ahorro Total Anual:

$$3,240 \text{ UF/año.}$$

Margen de Ahorro Total:

$$\text{Margen Total} = \frac{3,240}{21,870} \times 100 = 14.81 \%$$

Conclusión y Recomendaciones

La implementación de hornos rotatorios de alta eficiencia en la Compañía Minera Cerro Negro S.A. marca un avance crucial hacia la modernización de su proceso de secado de concentrado de cobre. Este proyecto no solo responde a las limitaciones del método tradicional basado en planchas de leña, como los elevados costos operativos, los largos tiempos de secado y las inconsistencias en la calidad del producto, sino que también aborda importantes desafíos ambientales y de seguridad laboral.

La reducción de los tiempos de secado, de entre 6 y 12 horas a solo 1 a 2 horas por lote, mejorará la productividad general de la planta, eliminando cuellos de botella y garantizando un flujo operativo más eficiente. Además, el control automatizado de temperatura y humedad permitirá obtener un producto con un contenido de humedad uniforme, cumpliendo con los estándares exigidos por los mercados internacionales. En términos económicos, la disminución del consumo energético de 450 kWh a 250 kWh por tonelada procesada genera un ahorro significativo, proyectado en más de 600 UF anuales. La eliminación del uso de 1.080 toneladas de leña no solo reduce costos asociados a su adquisición y manejo, sino que también elimina la generación de residuos sólidos como cenizas, optimizando aún más los recursos de la planta. En el ámbito ambiental, la reducción del 70% en las emisiones de CO₂, equivalente a aproximadamente 76,9 toneladas anuales, posiciona a Cerro Negro como una empresa alineada con las metas de sostenibilidad globales, reforzando su compromiso con el cuidado del medio ambiente. Este cambio también contribuye a cumplir normativas nacionales e internacionales, fortaleciendo la reputación de la empresa como un actor responsable en la industria minera. Desde una perspectiva social, la incorporación de esta tecnología mejorará las condiciones de trabajo al eliminar la manipulación de brasas y la exposición a altas temperaturas. Asimismo, fomentará la capacitación del personal, generando nuevas oportunidades de desarrollo profesional y fortaleciendo la seguridad laboral.

En síntesis, este proyecto no solo resuelve las problemáticas actuales del proceso de secado, sino que también prepara a la Compañía Minera Cerro Negro S.A. para un futuro más competitivo, eficiente y sostenible, reafirmando su posición como líder en innovación y responsabilidad en el sector minero.

Bibliografía

- <https://cerronegro.cl/nosotros/>
- <https://www.guiaminera.cl/compania-minera-cerro-negro-s-a/>
- <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-de-valparaiso/2023/12/27/autoridades-por-posible-cierre-de-minera-cerro-negro-andamos-mendigando-para-pedir-trabajo.shtml>
- <https://listado.mercadolibre.cl/lena-seca-en-saco-eucalipto>
- https://www.sii.cl/valores_y_fechas/uf/uf2024.htm
- <https://e-ficiencia.com/cual-es-la-mejor-lena-para-la-chimenea/>
- <https://www.santiavelli.net/el-poder-calorifico-de-la-lena/>
- <https://es.kindle-tech.com/articles/rotary-furnaces-a-comprehensive-guide-to-advanced-materials-processing>
- <https://es.kindle-tech.com/articles/maximize-rotary-furnace-performance-design-advancements-for-efficient-material-processing>
- <https://ccm-eleva.cl/estandares-mineros/buscador/wp-content/uploads/2019/11/U-0400-8121-007-V03.pdf>
- <https://serviexltda.com/la-guia-definitiva-para-gestionar-concentrado-de-cobre-en-chile/>
- <https://www.redalyc.org/journal/6078/607866567002/html/>
- <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contr-a-el-cambio-climatico/naciones-unidas/elementos-acuerdo-paris.html>
- <https://www.codelco.com>
- <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/>
- <https://www.metso.com/>
- <https://www.bcentral.cl/>
- <http://www.cochilco.cl>
- <http://www.sii.cl>
- <http://www.organicfarmchile.com>