



FACULTAD DE
INGENIERÍA Y
CIENCIAS

INFORME PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL EN MINERÍA

**IMPACTO ECONÓMICO GENERADO AL EXTENDER LA
VIDA ÚTIL DE ACTIVOS MINEROS ESTRUCTURALES
CORROÍDOS POR NEBLINA ÁCIDA EN LA PLANTA DE
ELECTROOBTENCIÓN DE MINERA EL ABRA
MEDIANTE EL DISEÑO Y LA IMPLEMENTACIÓN DE
VENTILADORES DIRECCIONALES, TECNOLOGÍA HVLS
Y REVESTIMIENTO RUSTGRIP®**

Autor: Diego Leandro López Pizarro

Mail: diegolopez@alumnos.uai.cl

Rut: 19.928.996-9

Carrera: Ingeniería Civil en Minería

Prof. Guía: Alberto Inostroza

Supervisor: Mauricio Montero

Cargo: Gerente Comercial

Empresa: Betapaint®

Mail: mmontero@betapaint.cl

Peñalolén, Santiago de Chile.

DICIEMBRE 2023

RESUMEN EJECUTIVO

En las celdas convencionales de electroobtención de cobre se produce un fenómeno inherente al proceso productivo de cátodos denominado neblina ácida. En palabras simples, la reacción que se produce en las celdas electrolíticas genera oxígeno en el ánodo, formando burbujas las cuales arrastran microgotas de ácido sulfúrico hacia el ambiente generando aerosoles como neblina ácida en la zona habitable. Estas emanaciones son ante todo perjudiciales para la salud de las personas, pero también tienen efectos significativos en los costos de las compañías al ser muy corrosivas. Es por ello que se debe mantener un constante monitoreo del estado de las estructuras para efectuar las mantenciones pertinentes y así evitar el riesgo de colapso de la nave de electroobtención (EW).

Minera El Abra – filial de Freeport-McMoRan (FCX) y CODELCO– combate la neblina ácida mediante un sistema de 8 ventiladores que actúan en conjunto con esferas de polipropileno y la presencia del aditivo FC-1100 en el electrolito. Sin embargo, las concentraciones actuales de ácido en la nave se mantienen en $0,27 \text{ [mg/m}^3\text{]}$, valor muy cercano al límite permisible ponderado (LPP) que establece el D.S. N°594, el cual permite concentraciones de hasta $0,29 \text{ [mg/m}^3\text{]}$. En efecto, Minera El Abra considera el mantenimiento preventivo de estructuras corroídas cada 5 años, generando un paro operacional programado con una duración de 45 días corridos al 50% de su producción.

Para reducir la concentración de neblina ácida en la nave EW y evitar los paros operacionales programados, el presente proyecto propone un esquema de solución que consiste en la implementación de 12 ventiladores HVLS y 40 ventiladores direccionales. Esto permitirá diluir la concentración de ácido en un mayor volumen de aire y renovar la totalidad del aire al interior de la nave en 3 minutos, obteniendo una concentración final de $0,03 \text{ [mg/m}^3\text{]}$. Asumiendo una relación lineal entre la concentración de ácido y la frecuencia de mantenimiento, se infiere que el periodo de mantención preventiva aumenta a 45 años. Ahora bien, a pesar de que la concentración de ácido al interior de la nave se verá reducida, sigue existiendo el desgaste natural de los aceros por las condiciones climáticas. Para evitar mantenciones producto del ambiente, se pretende utilizar RustGrip® en el área interior y exterior de la nave, considerando además elementos estructurales críticos (pilares, cerchas y costaneras). Esto asegura que se cumplan las mantenciones en el periodo indicado.

Para justificar la inversión a realizar, se compara el costo de la solución (US\$1.055.199) con las pérdidas asociadas a los paros operacionales (US\$418.005.581), sin considerar los costos de mantención como tal. De esto se desprende que existirá un ahorro del 99,75% si se evita la disminución parcial en la producción de la planta EW por mantenciones programadas producto de la corrosión de activos mineros estructurales por neblina ácida.

ABSTRACT

In the conventional copper electrowinning cells, there is an inherent phenomenon in the cathode production process called acid mist. In simple terms, the reaction occurring in the electrolytic cells generates oxygen at the anode, forming bubbles that carry microdroplets of sulfuric acid into the environment, creating aerosols known as acid mist in the living area. These emissions are primarily harmful to human health and also have significant effects on company costs due to their corrosive nature. Therefore, constant monitoring of the structural condition is essential to perform necessary maintenance and prevent the risk of collapse of the electrowinning (EW) facility.

Minera El Abra, a subsidiary of Freeport-McMoRan (FCX) and CODELCO, combats acid mist through a system of 8 fans that work in conjunction with polypropylene spheres and the presence of the FC-1100 additive in the electrolyte. However, current acid concentrations in the facility remain at 0.27 [mg/m³], a value very close to the permissible weighted limit (PWL) set by D.S. No. 594, which allows concentrations up to 0.29 [mg/m³]. In fact, Minera El Abra considers preventive maintenance of corroded structures every 5 years, leading to a scheduled operational shutdown lasting 45 consecutive days at 50% of its production capacity.

To reduce the concentration of acid mist in the EW facility and avoid scheduled operational shutdowns, this project proposes a solution scheme involving the implementation of 12 High Volume Low Speed (HVLS) fans and 40 directional fans. This will dilute the acid concentration in a larger volume of air and completely refresh the air inside the facility within 3 minutes, achieving a final concentration of 0.03 [mg/m³]. Assuming a linear relationship between acid concentration and maintenance frequency, it is inferred that the preventive maintenance period increases to 45 years. However, despite the reduction in acid concentration inside the facility, there is still natural wear of the steels due to weather conditions. To prevent maintenance due to environmental factors, RustGrip® is intended for use in both the interior and exterior areas of the facility, considering critical structural elements such as pillars, trusses, and beams. This ensures that maintenance is carried out within the specified period.

To justify the investment, the solution cost (US\$1,055,199) is compared with the losses associated with scheduled operational shutdowns (US\$418,005,581), excluding maintenance costs. This reveals a savings of 99.75% by avoiding partial reduction in EW plant production due to scheduled maintenance caused by the corrosion of structural mining assets by acid mist.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN EJECUTIVO.....	1
ABSTRACT.....	2
TABLA DE CONTENIDOS.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.1. CONTEXTO DE LA EMPRESA.....	4
1.2. CONTEXTO DEL PROBLEMA.....	4
1.3. MINERA EL ABRA.....	5
2. OBJETIVOS.....	7
2.1. OBJETIVO GENERAL SMART.....	7
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
3. ESTADO DEL ARTE.....	8
3.1. ELECTROLITO.....	8
3.2. AIRE.....	10
3.3. ESTRUCTURAS.....	10
4. SOLUCIONES PROPUESTAS.....	11
4.1. Esferas antinebulizantes en conjunto con el sistema de captura y depuración de neblina ácida.....	11
4.2. Ventilación y sistemas de renovación de aire en conjunto con la protección de estructuras.....	14
4.3. Dispositivo Electrónico Insertable (DEI).....	16
5. SOLUCIÓN ESCOGIDA.....	20
6. DESARROLLO DE SOLUCIÓN.....	22
6.1. ANTECEDENTES PREVIOS.....	22
6.2. SITUACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL DE VENTILACIÓN.....	23
6.3. DISEÑO DE SOLUCIÓN.....	23
I. Desestratificar el aire incorporando tecnología HVLS montada en la cubierta de la nave.....	24
II. Implementar un sistema de renovación de aire que impida la acumulación de neblina ácida al interior de la nave EW.....	27
III. Aplicar RustGrip® al interior y exterior de la nave para evitar el desgaste natural de los aceros que la conforman.....	28
7. EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	30
7.1. COSTOS DE INVERSIÓN.....	30
7.2. COSTOS DE APLICACIÓN.....	31
7.3. OTROS COSTOS.....	33
8. METODOLOGÍAS.....	33
9. MEDIDAS DE DESEMPEÑO.....	35
10. DESARROLLO DEL PROYECTO.....	38
11. RESULTADOS.....	39
12. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN.....	42
REFERENCIAS.....	43
ANEXOS.....	45

1. INTRODUCCIÓN

1.1. CONTEXTO DE LA EMPRESA

Betapaint® es distribuidor exclusivo de las empresas estadounidenses Superior Products International (SPI) y Big Ass Fans. Además, posee la representación exclusiva de la empresa alemana WEBAC®, entregando así soluciones a la industria agrícola, portuaria, minera e industrial. La empresa se encarga de desarrollar la totalidad de los proyectos, realizando la ingeniería, suministrando los productos y su posterior aplicación.

Con sedes en Chile, Perú y Guatemala, Betapaint® está constituida por tres unidades de negocio: BETAPAIN (revestimientos industriales e inyecciones de resina); BETABAF (ventilación industrial); y BETAHOGAR (films y revestimientos a menor escala). Cada una de estas divisiones tiene por objetivo la ejecución de obras civiles, y en su reemplazo, responde a las diferentes problemáticas a través de soluciones poco invasivas –tanto a nivel estructural como en consumo energético– y definitivas.

Actualmente Betapaint® es considerada una empresa altamente consolidada en la industria, estableciendo ventajas competitivas de calidad respecto a sus competidores. Si bien posee precios elevados en comparación al mercado, la empresa destaca por la vanguardista nanotecnología de sus productos, generando confianza en los clientes debido a su certificada eficiencia.

1.2. CONTEXTO DEL PROBLEMA

En 2022, Chile aportó con el 24% (5328 KTMF) de la producción mundial de cobre, manteniendo así su liderazgo como principal productor de cobre en el mundo. De este total, 52.6% (2802 KTMF) fue comercializado mediante concentrado de cobre, 26.5% (1414 KTMF) mediante cátodos SX-EW, y 20.9% (1112 KTMF) mediante cobre de fundición¹.

Según el análisis de escenarios desarrollado por CESCO en su estudio “Cobre refinado, un buen negocio para Chile”, la producción futura de cobre en Chile se basará en la extracción y procesamiento de sulfuros de cobre, los que dan origen a concentrados. Esto se debe a la disminución de las leyes y la creciente complejidad de explotación en los grandes yacimientos cupríferos debido a su morfología. Además, los yacimientos de óxidos –tratados comúnmente mediante la vía hidrometalúrgica– han comenzado a agotarse y se espera que en 2035 generen menos del 5% de la producción de cobre del país.

¹ (S/f-a). Consejominero.cl. Recuperado el 24 de agosto de 2023, de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2023/07/Cifras-Actualizadas-de-la-Mineria-2023-Julio.pdf>

Este inminente escenario deja al descubierto una serie de problemas referente a la comercialización de concentrados como principal producto de exportación².

En primer lugar, la pérdida en la cadena de valor aleja a Chile del cliente final, lo cual atenta directamente a la economía circular y su responsabilidad en el consumo y producción sostenible (ODS 12). En segundo lugar, debido a que los concentrados contienen impurezas consideradas tóxicas, no solo tienen restricciones de ingreso a la mayoría de los mercados, sino que tienen protocolos de transporte marítimo que son más caros y que podrían encontrar impedimentos futuros. En tercer y último lugar, los concentrados deben contar con instalaciones especiales para ser almacenados (en general, la capacidad de almacenamiento global no supera unas pocas semanas de producción), por lo que un potencial corte en las cadenas de suministro podría forzar el cese de la producción, y en efecto, el cierre de minas.

Bajo este contexto y con miras en el futuro, se hace fundamental la construcción de nuevas fundiciones y/o la expansión de las actuales con tecnologías competentes para enfrentar los estándares ambientales y así cambiar la percepción que apremia la licencia social. No obstante, **la proyección de escenarios exige la optimización de los procesos involucrados en la obtención de cátodos de cobre para así maximizar los beneficios del actual negocio minero.**

Este es el punto de partida del presente proyecto de título, el cual tiene como objetivo el diseño y análisis económico de implementar una solución que permita extender la vida útil de activos mineros corroídos en la planta de electroobtención de Minera El Abra mediante el reforzamiento estructural y la disminución en la concentración de ácido sulfúrico en el aire producto de la neblina ácida generada en el proceso de obtención de cátodos.

1.3. MINERA EL ABRA

Minera El Abra, filial de Freeport-McMoRan (FCX), es una faena minera de cobre a rajo abierto ubicada a 75.6 kilómetros al noreste de la ciudad de Calama, Provincia de El Loa, en la Región de Antofagasta, Chile. La faena, cuya principal actividad es la producción de cátodos de cobre, comparte la participación de las acciones con la Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco), siendo un 51% propiedad de FCX y el 49% restante correspondiente a Codelco³. Para la obtención de cátodos, El Abra cuenta con la mineralización de óxidos y sulfuros lixiviables, los cuales procesa mediante el flujo operacional ilustrado en el anexo 1. La compañía posee una planta de extracción por

² Riquelme, S. (2020, julio 20). Exportar cobre refinado es un buen negocio. Guía Minera de Chile. <https://www.guiaminera.cl/exportar-cobre-refinado-es-un-buen-negocio/>

³ El Abra. (s/f). El Abra. Recuperado el 28 de agosto de 2023, de <https://www.elabra.cl/el-abra>

solventes (SX) y electro-obtención (EW) cuya capacidad asciende a 500.000.000 [lb/a] de cátodos de cobre, conectada a un circuito de lixiviación (LX) de 115.000 [t/d] y una operación de lixiviación de mineral en bruto de similar capacidad. En 2022, Minera El Abra alcanzó una producción de 91.649 toneladas métricas de cobre.

En particular –y como objeto de estudio del presente informe–, en el proceso EW se presenta un fenómeno químico denominado neblina ácida. En palabras simples, la reacción que se produce en las celdas electrolíticas genera oxígeno que forma burbujas, las cuales arrastran microgotas de ácido sulfúrico hacia el ambiente formándose la neblina ácida (ver anexo 2). Estas emanaciones son ante todo perjudiciales para la salud de las personas, pero también tienen efectos en los costos de las compañías al ser muy corrosivas. Esto último obliga a mantener un constante monitoreo del estado de los electrodos, las estructuras, el puente grúa, los cables eléctricos y los activos mineros en general⁴.

En su planificación minera, El Abra considera el mantenimiento preventivo de estructuras corroídas cada 5 años, generando un paro operacional programado con una duración de 45 días corridos; 20 para el sector este y 25 para el sector oeste pues la operación nunca se detiene completamente. Esto se traduce en pérdidas millonarias por concepto de la detención parcial de la producción.

Según estudios realizados por BETABAF en mayo de 2022 y sustentadas por mediciones recibidas del mandante (Sociedad Contractual Minera El Abra), el escenario pesimista para las concentraciones de ácido en el aire es de 0,27 [mg/m³], valor muy cercano al límite permisible ponderado (LPP) que establece el D.S. N°594, el cual –según las correcciones de altura y jornada laboral presentadas en el anexo 3– permite concentraciones de hasta 0,29 [mg/m³]. Para evitar sobrepasar este valor, la nave EW cuenta con 8 ventiladores que actúan en conjunto con esferas de polipropileno y la presencia del aditivo FC-1100 en el electrolito (para más detalle del aditivo, ver anexo 4). En paralelo, la nave cuenta con 9 aberturas (puertas correderas) ubicadas entre los ventiladores, además de una apertura a lo largo de toda la cubierta (en el eje) que permite renovaciones espontáneas de aire.

Ahora bien, la disminución en las concentraciones de ácido sulfúrico en el aire es fundamental para extender la vida útil de los activos mineros estructurales. Adicionalmente, si se protege el sustrato expuesto al ambiente mediante revestimientos industriales de alta tecnología, la vida útil de la nave aumentaría de forma considerable, reduciendo así el número de paros operacionales por concepto de mantención. Esto permitiría un ahorro importante para el actual negocio minero, maximizando así el beneficio económico.

⁴ Eliminando las neblinas ácidas en EW - Minería Chilena. (s/f). Minería Chilena. Recuperado el 28 de agosto de 2023, de <https://www.mch.cl/reportajes/eliminando-las-neblinas-acidas-en-ew/>

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL SMART

Diseñar y analizar la factibilidad económica de implementar una solución que permita reducir el número de paros operacionales en la nave EW de Minera El Abra por concepto de mantención de activos estructurales corroídos por neblina ácida.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Cuantificar las pérdidas asociadas a los paros operacionales producto del mantenimiento programado en la planificación actual de la nave EW.
- II. Relacionar el tiempo de vida útil de los activos mineros estructurales con las concentraciones de ácido sulfúrico presentes en el ambiente de la nave EW.
- III. Simular –mediante el software SpecLab® y modelación dinámica– la disminución de ácido sulfúrico en la nave EW con la incorporación de ventiladores direccionales y tecnología HVLS.
- IV. Medir el impacto sobre la vida útil de los activos estructurales metálicos al disminuir las concentraciones de ácido en el aire y al reforzar el sustrato expuesto al ambiente corrosivo mediante la aplicación de RustGrip®.
- V. Contrastar las pérdidas producidas por paros operacionales y el costo de implementar la solución para así justificar su viabilidad a largo plazo.

3. ESTADO DEL ARTE

Para combatir la corrosión de activos mineros estructurales por neblina ácida en naves EW, el actual estado del arte se basa en una combinación de técnicas y estrategias para prevenir, proteger y mantener las estructuras metálicas en condiciones óptimas. Debido a la naturaleza de las soluciones, a continuación se presentan una serie de alternativas que permiten combatir desde diferentes aristas al mismo problema (neblina ácida):

3.1. ELECTROLITO

En la electroobtención, el cobre metálico se recupera desde una solución de sulfato de cobre ácido mediante el proceso de electrólisis, sumergiendo dos electrodos (cátodo y ánodo) en una solución electrolítica de cobre (electrolito), la cual es una mezcla de agua (H_2O), ácido sulfúrico (H_2SO_4) y sulfato de cobre ($CuSO_4$). Debido a que la neblina ácida se produce por la liberación de oxígeno gaseoso (O_2) en la solución electrolítica, existen diferentes medidas para evitar su desprendimiento, y por consiguiente, la formación de ácido en el ambiente en forma de aerosol:

- *Barreras mecánicas*: Son elementos inertes (tales como membranas, lonas o esferas antinebulizantes), los cuales tienen la propiedad de flotar en la interfase electrolito-aire. El método de barrera más utilizado en celdas EW son las esferas de polipropileno, las cuales se utilizan en grandes cantidades para formar una especie de “manto” (de una o más capas), que cubre y detiene la pérdida de electrolito que se produce por medio de la evaporación y la reacción electroquímica en sí. Además, el manto de esferas conserva efectivamente la energía calórica al actuar como aislante térmico, manteniendo así la estabilidad del electrolito (pues las celdas trabajan a temperaturas relativamente altas respecto a la temperatura ambiente, oscilando entre 30°C a 60°C dependiendo de su diseño). Minera El Abra cuenta con esferas de polipropileno en sus celdas EW como método de barrera para disminuir la formación de neblina ácida.
- *Electrolitos menos ácidos*: Se pueden emplear electrolitos con un pH más neutro o alcalino en lugar de electrolitos altamente ácidos. Esto reducirá la formación de gases ácidos, y por lo tanto, la neblina ácida. Sin embargo, un electrolito menos ácido puede suscitar una serie de problemas y desafíos (como la reducción de la eficiencia de deposición, disminución en la calidad del producto, precipitación de impurezas y reacciones no deseadas), aunque

también puede ofrecer ciertas ventajas (principalmente ligadas al control de la corrosión y neblina ácida).

- Aditivos: Sin entrar en mayor detalle, algunos de los aditivos más utilizados en la industria minera para combatir la neblina ácida y mejorar la eficiencia del proceso de electroobtención de cobre, incluyen:
 - Aditivos inhibidores de espuma: Estos son comunes en la industria minera para controlar la formación de espuma en el electrolito (véase el anexo 5 para mayor información sobre el impacto de la espuma en la formación de neblina ácida). Estos aditivos evitan que la espuma atrape partículas de neblina ácida y ayuda a mantener una operación más estable y eficiente.
 - Aditivos tensoactivos: Los tensoactivos se utilizan para romper burbujas de gas y reducir la formación de espuma. Esto puede contribuir a la reducción de la neblina ácida y mejorar la calidad del electrolito. En sus celdas EW, Minera El Abra cuenta con un tensoactivo fluoroquímico llamado FC-1100.
 - Agentes secuestrantes o tampones: Estos se utilizan para mantener el pH del electrolito dentro de un rango adecuado, lo que ayuda a controlar la formación de gases ácidos y reduce la probabilidad de neblina ácida.
 - Aditivos antiespumantes: Los aditivos antiespumantes son útiles para romper la espuma ya generada en la superficie del electrolito, evitando la acumulación de espuma y las partículas de neblina ácida.
 - Polímeros y agentes floculantes: Estos compuestos ayudan a unir partículas en suspensión en el electrolito, facilitando su eliminación y reduciendo la formación de aerosoles ácidos.

3.2. AIRE

Como fue mencionado anteriormente, debido a la sensibilidad del electrolito y sus efectos colaterales en el proceso de electroobtención, muchas operaciones mineras combaten la neblina ácida una vez generada, sin la necesidad de intervenir la solución. Para ello, se utilizan las siguientes tecnologías que permiten incidir en el fenómeno desde el aire:

- Sistemas de supresión: Estos sistemas implican el uso de nebulizadores de agua o soluciones químicas que se rocían en el aire para atrapar y neutralizar las partículas ácidas y los aerosoles antes de que se dispersen.
- Ventilación y sistemas de renovación de aire: Mejorar la ventilación en la planta y ,a su vez, utilizar sistemas adecuados de inyección/extracción de aire es fundamental para reducir las concentraciones de vapores y aerosoles ácidos del entorno de trabajo.
- Sistemas de captura y depuración (scrubbers): Este sistema comienza con la captura de neblina ácida desde la fuente (celdas). Posteriormente, se conduce a través de ductos hasta un lavador de gases que limpia el aerosol contaminante con una muy elevada eficiencia, devolviéndolo al ambiente circundante. “Metso”, “CECO Environmental” y “AMCA Systems” son algunas de las empresas proveedoras de este servicio.

3.3. ESTRUCTURAS

El cuidado de estructuras (e infraestructuras) es fundamental para reducir riesgos de colapso y así asegurar la integridad de los trabajadores que operan en la nave EW. Adicionalmente, permite maximizar la vida útil de la nave y así garantizar una prolongada e ininterrumpida operación. Entre las soluciones más utilizadas a nivel estructural se encuentran:

- Celdas de electroobtención avanzadas: Siendo una solución de diseño, estas celdas incorporan tecnologías avanzadas y mejoradas en comparación con las celdas convencionales, lo que les permite alcanzar niveles más altos de eficiencia y reducción de costos. Entre algunas de las tecnologías que adquieren se encuentra la eficiencia energética, automatización y reducción de emisiones contaminantes.

- *Materiales y revestimientos con resistencia a la corrosión:* El diseño inicial de toda nave EW contempla la utilización de materiales anticorrosivos (tales como acero inoxidable, polímeros reforzados con fibra de vidrio, polipropileno y otros plásticos de ingeniería) debido al ambiente agresivo en donde operan. Sumado a esto, y como un sistema más bien complementario, la gran mayoría de operaciones mineras en Chile utilizan la protección de estructuras mediante revestimientos industriales para disminuir su tasa de corrosión. Algunos de estos revestimientos funcionan como ánodos de sacrificio.
- *Tratamiento de aceros corroídos:* Debido a la inminente corrosión de los aceros en ambiente ácido, en algunas operaciones se utiliza el tradicional método de tres pinturas para su recuperación. Este tratamiento incluye un granallado previo para posteriormente aplicar pinturas anticorrosivas, epóxicos y un elemento de terminación (para más detalles, ver anexo 6).

4. SOLUCIONES PROPUESTAS

Teniendo en consideración que el objetivo general del presente proyecto de título es el diseño y análisis económico de una solución que permita extender la vida útil de activos estructurales mineros en la nave EW de Minera El Abra, a continuación se presentan tres soluciones que cumplen tal fin. Estas soluciones están basadas en una combinación del estado del arte mencionado en el inciso anterior, en conjunto con la decisión de Minera El Abra de no seguir contando con el uso del aditivo FC-1100.

4.1. Esferas antinebulizantes en conjunto con el sistema de captura y depuración de neblina ácida:

Si bien el sistema de captura y depuración es altamente eficiente en el control de neblina ácida, se optará por seguir utilizando las esferas antinebulizantes como complemento hasta que cumplan su vida útil. Posteriormente, el sistema seguirá funcionando de manera independiente.

Con el fin de entender correctamente el esquema de solución, a continuación se presenta en detalle cada una de las etapas involucradas:

a) Esferas antinebulizantes:

Debido a su bajo costo (en comparación a otras materialidades), Minera El Abra dos capas de esferas de polipropileno de 19 [mm] de diámetro. Estas esferas flotan sobre en las celdas para fomentar la coalescencia de las diminutas gotas de electrolito.

b) Sistema de captura y depuración:

Este proceso inicia con la captura de neblina ácida desde las celdas de electroobtención a través de la campana colectora ilustrada en la figura 1, la cual –además– muestra la presencia de dos capas de esferas de polipropileno en la solución electrolítica.

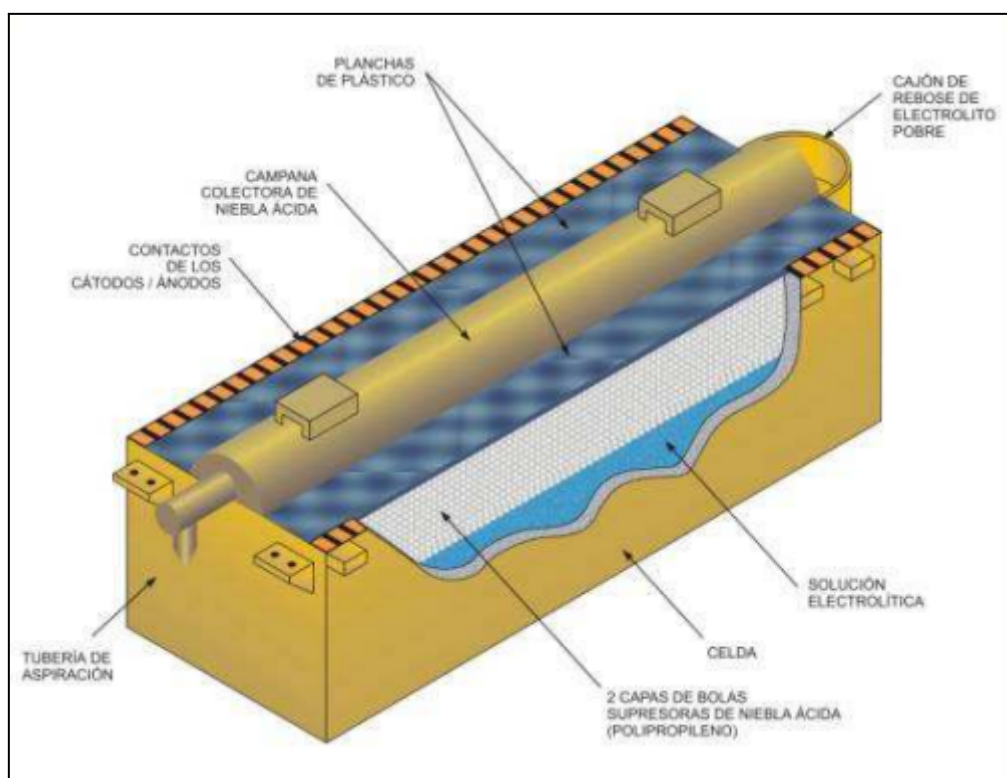


Figura 1. Sistema de captura de neblina ácida en celdas electrolíticas.

Fuente: “Procesos de electroobtención de cobre”, Roberto Alfaro.

Esta campana cuenta con planchas de plástico con el objetivo de cubrir la mayor parte de la superficie de la celda, a excepción de las barras de contacto de los electrodos (esto se realiza para observar cualquier tipo de cortocircuito o falla eléctrica que pueda ocurrir en las celdas). Mediante un ducto de aspiración, la campana colectora conduce la neblina ácida hacia el depurador (o scrubber), el cual

tiene la función de lavar los gases por medio de una solución neutralizante, tal y como se presenta en la figura 2.

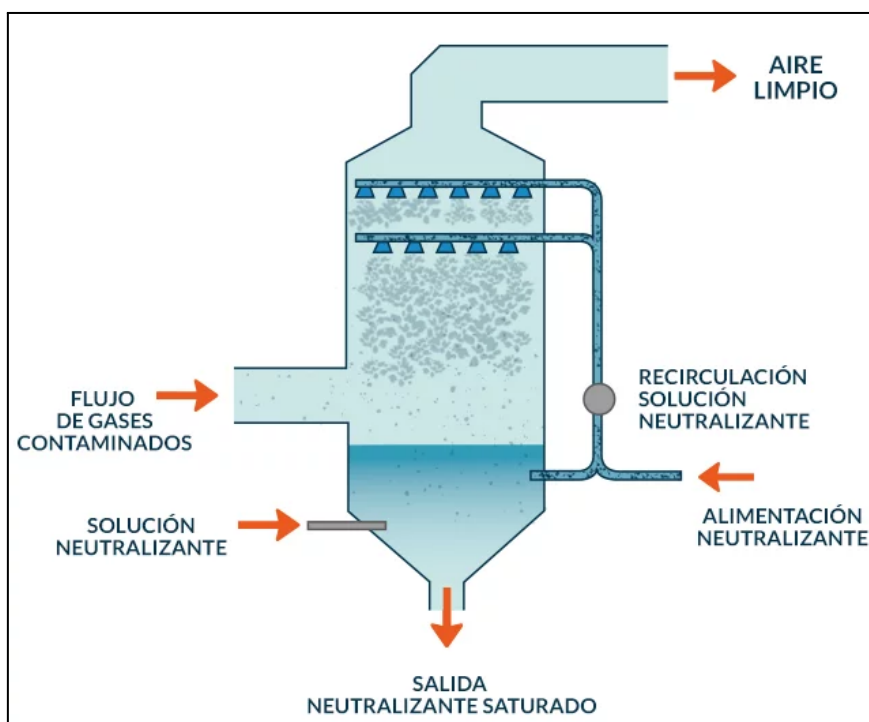


Figura 2. Diagrama del funcionamiento interno de un scrubber.

Fuente: MCAT®

En particular, para el lavado de neblina ácida se utiliza agua como solución neutralizante pues en combinación con la neblina ácida, ésta se condensa. Luego, la solución resultante (neblina ácida mezclada con agua) por rebose del tanque se conduce hacia el colector de drenaje principal de la nave EW para posteriormente ser dirigida hacia el tanque trampa de orgánico.

Finalmente, el diseño de global del esquema de solución con todos sus componentes se ilustra en la figura 3:

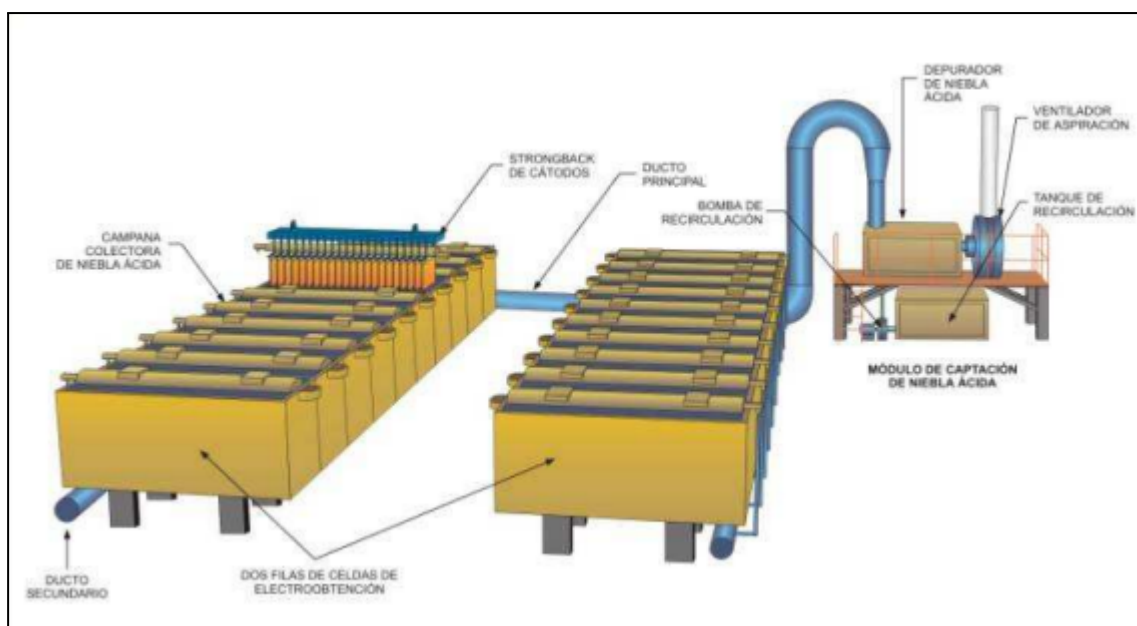


Figura 3. Esquema global del diseño de solución.

Fuente: “Procesos de electroobtención de cobre”, Roberto Alfaro.

4.2. Ventilación y sistemas de renovación de aire en conjunto con la protección de estructuras:

El presente esquema de solución consiste en aplicar medidas que disminuyan la generación de neblina ácida desde el electrolito, diluyan las concentraciones de ácido en el aire, y fortifiquen las estructuras metálicas de los efectos corrosivos. Para ello se utilizará las ya mencionadas esferas antinebulizantes; ventiladores HVLS para diluir la neblina ácida en un mayor volumen de aire; ventiladores direccionales para generar renovaciones de aire dentro de la nave; y la aplicación del revestimiento RustGrip® como una inyección de aluminio para generar sustrato en los activos mineros estructurales corroídos (o con potencial de corrosión debido a la exposición con el ambiente ácido).

A continuación se presenta en detalle cada una de las etapas del presente esquema de solución:

a. Esferas antinebulizantes:

Al igual que en la solución 3.1, se considera la utilización de las dos capas de esferas de polipropileno existentes en el actual sistema de Minera El Abra. Sin embargo, a diferencia de la solución anterior, el presente esquema requiere de la constante presencia de este método barrera para mantener las emisiones de neblina ácida en un umbral determinado.

b. Ventiladores HVLS:

Debido a que la neblina ácida se deposita en la zona habitable por su densidad (manifestándose hasta los 4 metros de altura de la nave), se busca diluir la concentración de moléculas ácidas en un mayor volumen de “aire limpio” mediante la instalación de ventiladores HVLS en serie. Este tipo de ventiladores permite homogeneizar grandes espacios a través de un bajo consumo energético. Ahora bien, la definición de los equipos y sus características (velocidad de giro, potencia, número de aspas, diámetro, altura y horarios de operación) deben ser estudiadas y modeladas para validar su efectividad.

c. Ventiladores direccionales:

Debido a que la nave EW no cuenta con hermeticidad (dado que presenta aberturas), se propone un sistema de únicamente de inyección de aire (sin extracción) con un determinado caudal para generar renovaciones espontáneas al interior de la nave cada cierto periodo de tiempo, permitiendo así la disipación de la neblina ácida generada en el proceso de electroobtención. Al igual que los ventiladores HVLS, para definir el número de equipos y sus especificaciones técnicas se requiere modelar las condiciones de la nave para validar la efectividad de su implementación.

d. Aplicación del revestimiento RustGrip®:

Si bien –con la implementación de ventiladores HVLS y ventiladores direccionales– las concentraciones de neblina ácida se reducirán considerablemente, y por consiguiente, el tiempo de vida útil de los activos estructurales mineros aumentarán; para maximizar aún más su permanencia se busca aplicar el revestimiento industrial llamado RustGrip® como método de protección ante los efectos corrosivos.

RustGrip®⁵ es un coating de poliuretano con nanopartículas de aluminio, auto imprimante y estable al UV. Es un producto que por sí solo entrega una barrera flexible, duradera y resistente para generar una protección contra la corrosión, reemplazando el tradicional esquema de múltiples pinturas (ver anexo 6). Al ser aplicado directamente sobre las superficies metálicas, RustGrip® penetra en la porosidad del sustrato metálico, sellando la superficie y evitando la formación de corrosión por tres vías:

⁵ Al impacto directo, R. (s/f). Rust Grip® control corrosión: Betapaint.cl. Recuperado el 24 de octubre de 2023, de <https://www.betapaint.cl/wp-content/uploads/2023/10/Rust-Grip-Ficha-Tecnica.pdf>

- I. Protección barrera, aislando el sustrato de los ataques del medio ambiente.
- II. Genera una protección galvánica, permitiendo que sus nanopartículas de aluminio actúen como ánodo de sacrificio.
- III. RustGrip® posee una patente de encapsulamiento, la cual asegura un anclaje que reduce la tasa de falla del revestimiento por problemas de desprendimiento, junto con evitar el avance de la corrosión interna en el sustrato.

4.3. Dispositivo Electrónico Insertable (DEI):

Considerada como una solución estructural (la cual modifica las celdas de electroobtención tradicionales llevándolas a celdas de electroobtención avanzadas), el DEI está concebido para actuar como ánodo en los proceso de electroobtención de metales, particularmente, para reemplazar la reacción anódica correspondiente a la descomposición electrolítica del agua [$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$, $E_0 = -1,23\text{V}$] por la oxidación del ion ferroso a ión férrico [$\text{Fe}^{+2} \rightarrow \text{Fe}^{+3} + \text{e}^-$; $E_0 = -0,77\text{V}$]. Esto implica el reemplazo de la reacción anódica actual por una reacción de menor requerimiento energético, permitiendo producir reacciones de oxidación por debajo del umbral energético de la descomposición electrolítica del agua, evitando así la generación de oxígeno gaseoso que es la principal causa de la neblina ácida.

En detalle, al interior del DEI, un ion ferroso (Fe^{+2}) contenido en el electrolito estratégico [EE; una solución rica en sulfato ferroso (FeSO_4)] se pone en contacto con el conductor o semiconductor estratégico (CSE; el cual se selecciona mediante ensayos de laboratorio) ubicado dentro de la caja del DEI, reaccionando electrolíticamente sobre la superficie del CSE en donde ocurre la transformación electrolítica del ion ferroso (Fe^{+2}) a ión férrico (Fe^{+3}), de manera que el EE que sale del DEI resulta con un alto contenido de ión férrico (Fe^{+3}). La reacción de transformación de ion ferroso a ión férrico implica la pérdida de electrones que se transportan por los conductores eléctricos hacia el cátodo, polarizándolo negativamente. En el cátodo ocurre la reducción del ion cúprico (Cu^{+2}), que capta los electrones depositándose como cobre metálico (Cu^0).

Al ocurrir las reacciones de Oxidación al interior del DEI y de Reducción del ión cúprico, resulta un desequilibrio de cargas positivas al interior del DEI y de cargas negativas en el electrolito rico (ER), que se compensa por el paso selectivo de

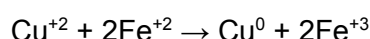
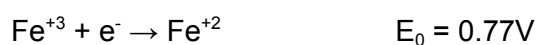
aniones a través de las membranas de intercambio desde el ER hacia el interior del DEI. El principal ión que se transfiere es el ión sulfato (SO_4^{-2}).

En consecuencia, la electroquímica del proceso de electroobtención de cobre (mostrada en el anexo 2) es reemplazada por:

- Reacción sobre la superficie CSE al interior del DEI:



- Reacción sobre la superficie catódica:



Con la finalidad de ilustrar los principales elementos que conforman el DEI, a continuación se presenta una vista en isométrica:

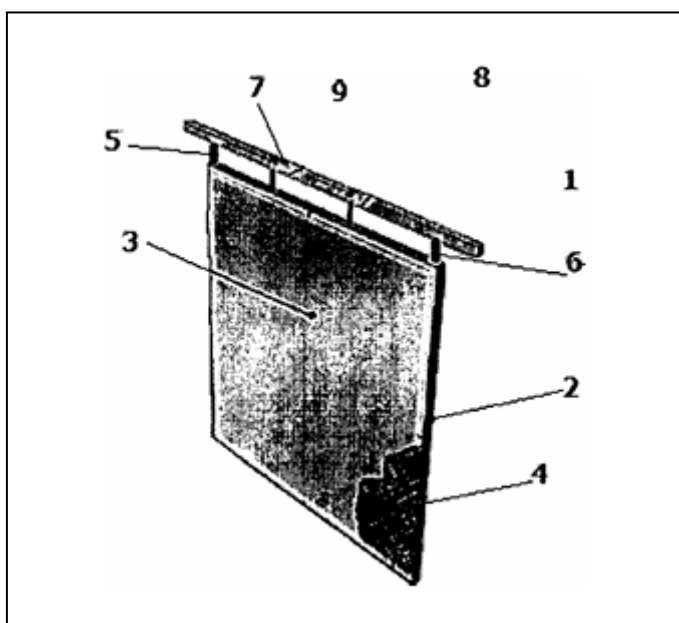


Figura 4. Vista en isométrica que muestra los elementos principales del DEI.

Fuente: Patente de invención; “Dispositivo Electrónico Insertable”, Jaime Simpson.

La figura 4 muestra el cartucho o contenedor que como unidad conforma el dispositivo DEI (1), el cual tiene una estructura polimérica que constituye un marco perimetral (2) que le otorga la resistencia estructural y asegura la hermeticidad del conjunto, impidiendo la fuga de soluciones desde el interior al exterior o viceversa, en donde este marco perimetral (2) trabaja en conjunto con unas paredes laterales

que están conformadas por unas membranas de intercambio iónico (3) ubicadas en ambos lados del cartucho, en donde por la cavidad interior que forman éstas membranas de intercambio iónico (3), se ubica un electrodo estratégico (4), que es un material conductor o semiconductor estratégico (CSE). En la parte superior izquierda del cartucho (1) se encuentra ubicado un dueto de entrada (5) y en la derecha un dueto de salida (6), en donde una barra conductora horizontal (7) está conectada eléctricamente con el electrodo estratégico (4), por medio de barras conductoras verticales (8), en que unas prensas o agarraderas (9), permiten insertar o retirar el DEI (1).

Ahora bien, teniendo en consideración el funcionamiento e implementación de las tres soluciones anteriormente explicadas, a continuación se presenta una tabla de ventajas/desventajas que busca comparar y destacar las características más relevantes de las soluciones propuestas y su implementación en Minera El Abra:

N°	SOLUCIÓN A IMPLEMENTAR	VENTAJAS	DESVENTAJAS
1	Esferas antinebulizantes en conjunto con el sistema de captura y depuración de neblina ácida.	<p>(1) Minera El Abra ya cuenta con la implementación de esferas de polipropileno, por lo que no se requerirá logística en su implementación.</p> <p>(2) El sistema de captura es altamente eficiente, eliminando toda sustancia ácida en el ambiente de la nave EW.</p> <p>(3) El sistema de depuración minimiza el impacto medioambiental, permitiendo cumplir la normativa vigente.</p> <p>(4) El sistema permite la recuperación de –al menos– el 98% de ácido sulfúrico y sulfato de cobre perdido en forma de aerosol, además de reciclar el 100% del agua utilizada en el proceso.</p> <p>(5) El sistema es altamente automatizado y requiere un mantenimiento mínimo.</p>	<p>(1) La implementación del sistema de captura y depuración requiere de una importante intervención estructural en las naves EW, lo que implica la detención total o parcial de la operación.</p> <p>(2) Los costos de inversión, instalación y mantenimiento son altos.</p> <p>(3) Se requiere de un consumo de energía eléctrica importante para su operación.</p> <p>(4) El sistema de depuración requiere de un espacio adicional en la planta.</p>
2	Ventilación y sistemas de renovación de aire en conjunto con la protección de estructuras.	<p>(1) La tecnología utilizada para la ventilación y renovación de aire es altamente eficiente en consumo energético.</p> <p>(2) La aplicación del esquema de</p>	<p>(1) Si bien el sistema de ventilación y renovación disminuyen las concentraciones de ácido en el aire de la nave EW, no se capturan ni eliminan los</p>

		<p>solución –en su totalidad– es compatible con la operación de la planta EW, es decir, su implementación permite la continuidad operacional.</p> <p>(3) Tanto los ventiladores como el revestimiento RustGrip® están exentos de mantenimiento, pudiendo operar 24/7 por largos periodos de tiempo.</p> <p>(4) El costo de inversión es considerablemente menor en contraste con las otras soluciones propuestas.</p> <p>(5) Al ser una solución poco invasiva (pues su implementación evita la obra civil), se requiere una menor cantidad de equipos y personas, reduciendo así la huella de carbono.</p> <p>(7) RustGrip® entrega una vida útil adicional a los activos mineros corroídos, disminuyendo los residuos generados.</p>	aerosoles ácidos.
3	Dispositivo Electrónico Insertable (DEI).	<p>(1) Al evitar la descomposición electrolítica del agua, el DEI elimina de raíz el problema de la neblina ácida evitando la generación de gases de cualquier tipo al medio ambiente.</p> <p>(2) Permite una operación con mayores densidades de corriente, lo que reduce el consumo específico de energía.</p> <p>(3) No requiere el uso de ánodos de plomo, evitando la generación de borras anódicas y residuos sólidos peligrosos.</p> <p>(4) Reduce el consumo de agua, ya que solo se debe reponer la evaporada y las purgas del sistema.</p>	<p>(1) Debido a que el DEI reemplaza a los ánodos convencionales, se requiere intervenir total o parcialmente la operación para su instalación.</p> <p>(2) Al ser un método innovador, de alguna manera es disruptivo para la minería tradicional. Esto podría conllevar una resistencia al cambio.</p>

Tabla 1. Matriz de ventajas y desventajas de las soluciones propuestas.

5. SOLUCIÓN ESCOGIDA

Para determinar la solución a implementar en Minera El Abra, se fijaron los siguientes criterios de ponderación:

- a) Eficacia en la reducción de neblina ácida (E_R): Define la cantidad de neblina ácida que la solución puede controlar o eliminar. Para cuantificar se establece una escala del 1 a 5; donde 1 significa que la solución tiene nulo impacto en el control de neblina ácida, mientras que 5 equivale a la eliminación total del fenómeno.
- b) Eficiencia energética (E_E): Define la eficiencia en términos de consumo energético para no afectar la eficiencia general del proceso de EW. Para cuantificar se establece una escala del 1 a 5; donde 1 significa que la solución requiere una gran cantidad de energía respecto al consumo general del proceso, mientras que 5 equivale a una solución sumamente eficiente.
- c) Costo de implementación y mantenimiento (C): El costo de adquisición, instalación y mantenimiento de la solución debe estar dentro de los límites presupuestarios. Esto incluye la disponibilidad y el costo de los productos químicos, equipos y sistemas necesarios. Para cuantificar se establece una escala del 1 a 5; donde 1 significa que la solución requiere un “bajo” costo de inversión y mantenimiento, mientras que 5 equivale a un costo considerablemente alto.
- d) Facilidad de integración (F): Define la facilidad de integrar la solución en el proceso existente de EW, sin requerir modificaciones significativas en la infraestructura y el personal. Además considera –en caso de ser necesaria– la detención parcial o total en la operación y los tiempos de implementación. Para cuantificar se establece una escala del 1 a 5; donde 1 significa que la solución requiere modificaciones importantes en la nave (celdas o infraestructura), mientras que 5 implica una solución no invasiva permitiendo la continuidad de la operación.
- e) Impacto al medioambiente (I): La solución debe estar en conformidad con las regulaciones ambientales y de seguridad relacionadas con la neblina ácida en la industria minera. Para cuantificar su impacto se establece una escala del 1 a 5; donde 1 significa que la solución impacta negativamente al medioambiente, mientras que 5 implica una solución con impacto positivo.

Luego, para encontrar la solución óptima se establece el siguiente método:

$$P_T = E_R + E_E + F + I - C \quad (1)$$

Donde,

P_T : Puntuación total.

E_R : Eficacia en la reducción de neblina ácida.

E_E : Eficiencia energética.

F_i : Facilidad de integración.

I : Impacto al medioambiente.

C : Costo de implementación y mantenimiento.

Dicho esto, a continuación se presenta la puntuación de cada solución a partir de los criterios anteriormente definidos:

Criterio/Solución	Esferas antinebulizantes en conjunto con el sistema de captura y depuración de neblina ácida	Ventilación y sistemas de renovación de aire en conjunto con la protección de estructuras	Dispositivo Electrónico Insertable (DEI)
Eficacia en la reducción de neblina ácida	4	3	5
Eficiencia energética	2	5	4
Facilidad de integración	2	5	1
Impacto al medioambiente	5	3	5
Costo de implementación y mantenimiento	-5	-2	-4
Puntaje total	8	14	11

Tabla 2. Matriz de puntuación para seleccionar la solución a implementar.

De esta manera, según el método utilizado se selecciona “Ventilación y sistemas de renovación de aire en conjunto con la protección de estructuras” como solución a implementar.

6. DESARROLLO DE SOLUCIÓN

6.1. ANTECEDENTES PREVIOS:

En primer lugar, se presentan los datos meteorológicos de Minera El Abra, información de relevancia que debe ser considerada en el diseño como parámetros iniciales del sistema.

Variable		Valor
Precipitaciones	Lluvia media	40 [mm/año]
	Nieve	Ocasionalmente
Viento	Dirección variable	-
	Máxima	30°C
	Media máxima	26°C
	Media mínima	-15°C
	Mínima	-20°C
Presión barométrica	Promedio	73 [kPa]
Humedad relativa	Media mínima	24%
	Media máxima	42%

Tabla 3. Datos meteorológicos de Minera El Abra.

Fuente: BETABAF.

Luego, se presentan las dimensiones de la nave EW (zona de estudio) para su modelación y estudio:

Variable	Valor
Largo	145 [m]
Ancho	44 [m]
Altura al hombro	9,2 [m]
Altura al eje	11,2 [m]
Volumen aproximado*	65.076 [m ³]

Tabla 4. Dimensiones de la nave EW.

(*): Volumen entregado por el mandante.

Fuente: BETABAF.

Actualmente la nave EW cuenta con un sistema de 8 ventiladores: 4 en el lado oriente (intractores) y 4 en el lado poniente (extractores). Estos equipos de 4 aspas tienen un diámetro aproximado de 1,2 metros de accionamiento manual. Cada equipo tiene un alcance lineal de 10 metros (medido con Anemómetro BT100), y se estima un caudal de 17.840 [m³/hr]. Por otra parte, la nave presenta 9 aberturas (puertas correderas) ubicadas entre los ventiladores, haciendo que la nave no presente hermeticidad.

6.2. SITUACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL DE VENTILACIÓN:

Los 4 ventiladores del lado oriente inyectan un caudal neto de 71.360 [m³/hr], generando alrededor de 1,096 renovaciones de aire por hora. Debido a que el alcance lineal de los ventiladores existentes es de hasta 10 metros, no afecta la zona media de la nave, generando un “aire limpio” únicamente en las zonas próximas a los ventiladores.

Por otra parte, los ventiladores que extraen aire en el lado oriente no cumplen ningún efecto relevante dado que solo extraen aire próximo a ellos y prácticamente limpio. Esto ocurre por la renovación espontánea que se genera debido a las aperturas laterales próximas a los ventiladores.

En conclusión:

- No se generan renovaciones de aire que incidan en la concentración ácida en la zona media de la planta.
- Por normativa (NCh 3308), lo recomendado para bajar la concentración ácida es de 20 a 30 renovaciones de aire por hora. Por lo tanto, el sistema actual no logra alterar las concentraciones de neblina ácida de forma significativa.
- Paralelamente, el sistema actual no considera la desestratificación del aire, la cual, de existir, permitiría bajar la concentración de neblina ácida al diluirla en un mayor volumen de aire.

6.3. DISEÑO DE SOLUCIÓN:

El principio de la solución radica en bajar la concentración de neblina ácida en la zona habitable, y próxima a su emisión. Para ello se propone:

I. Desestratificar el aire incorporando tecnología HVLS montada en la cubierta de la nave.

Con este fin, la nave EW fue modelada utilizando el software de análisis de confort de última generación SpecLab® (ver figura 5). Esta herramienta permite construir y analizar el espacio en un entorno 3D, simulando las temperaturas, corrientes de aire, turbulencias, renovaciones de aire y las configuraciones de los equipos. En forma adicional, se generó una modelación dinámica del proyecto con una herramienta llamada CFD (dinámica de fluidos computacional) para validar el diseño con datos de rendimiento del mundo real.

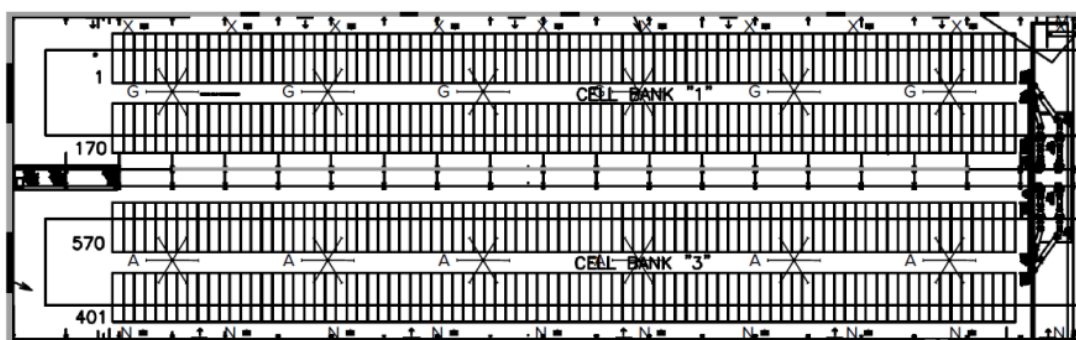


Figura 5. Diseño de la nave EW, Minera El Abra.

Luego de iterar varios modelos (con diferente cantidad de equipos, diámetros y número de aspas); se plantea la solución de incorporar 12 unidades HVLS de 7,3 metros de diámetro con 6 aspas (los detalles técnicos se presentan en el anexo 7). Esto permite desestratificar (homogeneizar) todo el aire de la nave según el siguiente detalle:

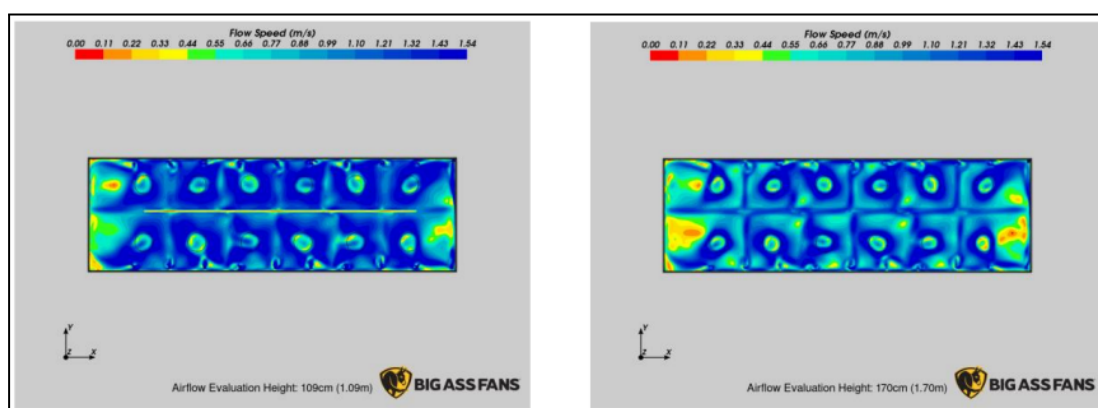


Figura 6. Flujo de aire en la nave EW (vista en planta).

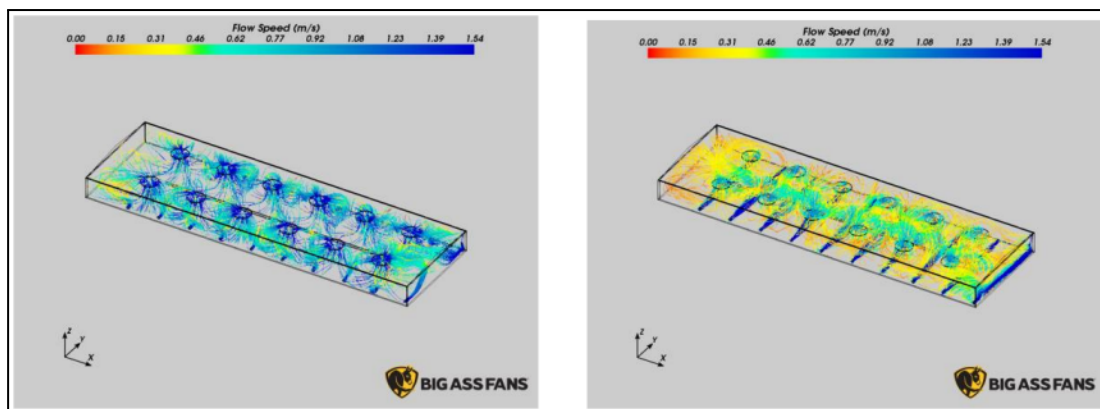


Figura 7. Flujo de aire en la nave EW (vista inclinada).

El alcance de los equipos cubre la zona habitable. A la izquierda de las figuras 6 y 7, se muestra el flujo del aire a 1,10 metros de altura, mientras que la foto de la derecha lo hace a 1,70 metros de altura.

La homogeneización del aire se completa en un tiempo de 4 minutos y 35 segundos (ver figura 8). No se producen turbulencias, ruidos y corrientes de aires asociadas a diferencias de presión. En paralelo se genera la inyección de aire asociada a la abertura en la parte central de la cubierta la que, sumada al caudal de los equipos, generan 2,5 renovaciones de aire por hora.

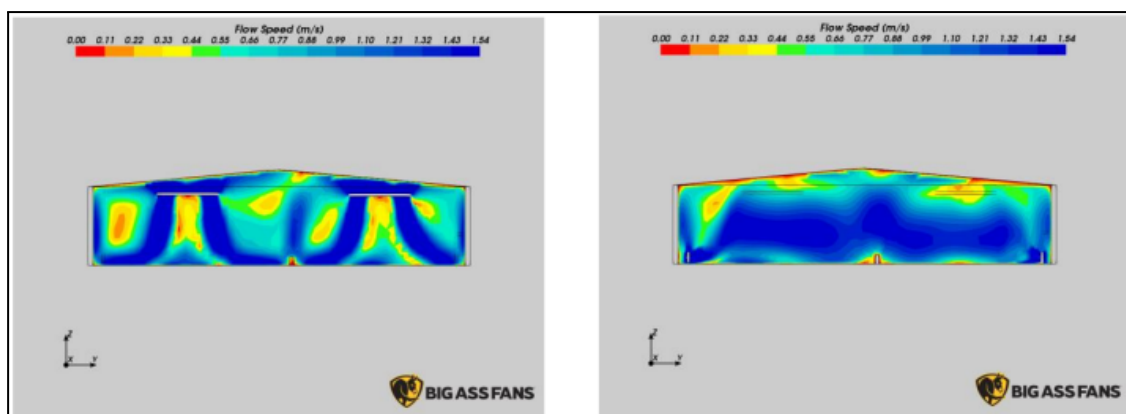


Figura 8. Elevaciones de la nave con el sistema de homogeneización.

A la izquierda se observa el ingreso de aire limpio por la parte alta de la cubierta, y a la derecha, el efecto causado por la desestratificación.

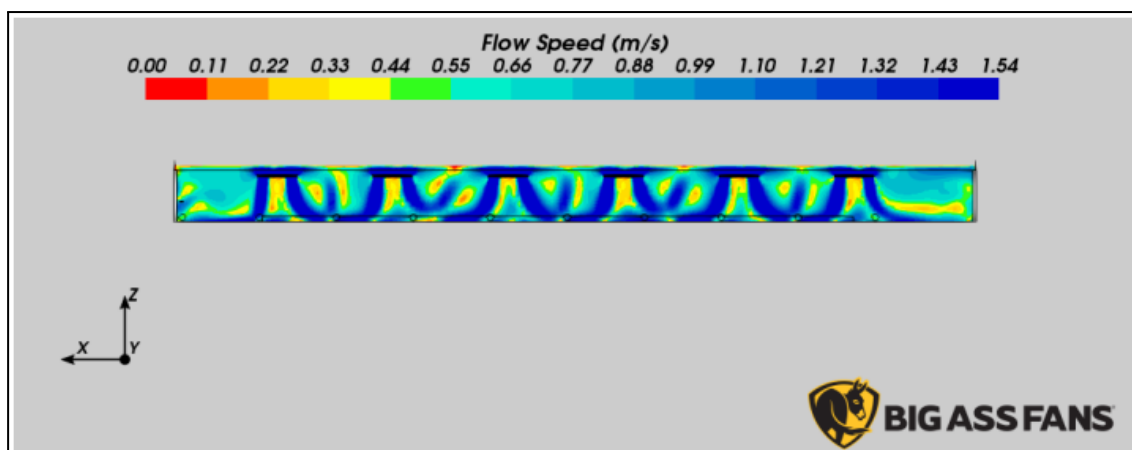


Figura 9. Elevación poniente.

Refleja la bajada y subida de aire (homogeneización) en toda la extensión de la nave.

Debido a que la neblina ácida se diluye en un mayor volumen de aire por concepto de homogeneización (ya que no se deposita únicamente en la zona habitable), existirá una disminución en su concentración.

Para argumentar cuantitativamente lo dicho con anterioridad, se asume una concentración existente pesimista (sustentada en el mayor valor registrado en las mediciones entregadas por el mandante) de $C_i=0,27 \text{ [mg/m}^3\text{]}$. Dado el peso de la neblina ácida, dicha concentración se deposita en la zona habitable de toda el área en estudio, hasta una altura de 4 metros, obteniéndose un volumen de aire ácido de $V_i=25.520 \text{ [m}^3\text{]}$. Con ello se determina una cantidad de contaminante $M=6.890 \text{ [mg]}$.

Dado que –una vez puesto en marcha los equipos de ventilación– la masa de aire aumenta a un volumen de $V_f=65.076 \text{ [m}^3\text{]}$ (volumen total de la nave), y considerando una cantidad constante de contaminante, la concentración final esperada es de $C_f=0,105 \text{ [mg/m}^3\text{]}$.

En efecto, el uso de los ventiladores señalados permite desestratificar el aire bajando la concentración de neblina ácida observada en un 60%. Además, en la práctica se va a registrar una disminución mayor de contaminante debido a que los cálculos están basados en un modelo cerrado, no teniendo en consideración la renovación de aire que hacen los ventiladores, como tampoco la renovación espontánea que se produce por las aperturas del lado poniente y oriente. El estimado de esas variables es de un 10%, justificada en los flujos de aire y velocidad, medida en el software SpecLab®.

II. Implementar un sistema de renovación de aire que impida la acumulación de neblina ácida al interior de la nave EW.

Tal y como fue mencionado en un inicio, la norma chilena NCh 3308 (calcada de la norma Ashrae 62,1) establece un rango de 20-30 renovaciones de aire por hora para ambientes nocivos industriales. Debido a que no se detalla el número de renovaciones para niebla ácida atribuida al ácido sulfúrico, se establece un mínimo de 20 renovaciones de aire por hora para mejorar en forma significativa las condiciones laborales.

Dado que la nave no cuenta con hermeticidad (lo que –en caso contrario– sugeriría un modelo de inyección y extracción por diferencia de presión), se plantea una solución que únicamente inyecte aire con un determinado caudal que permita la disipación de la neblina ácida.

Para lograr tal objetivo se propone el montaje de 20 equipos de inyección en el lado oriente y 20 equipos de inyección en el lado poniente (los detalles técnicos de los ventiladores direccionales se presentan en el anexo 8), tal y como se muestra en la figura 10. Cada equipo debe responder a un caudal de 33.980 [m³/hr], por lo que el caudal de inyección neto es de 1.359.200 [m³/hr]. Debido a que el volumen de aire al interior de la planta es de 65.100 [m³], los 40 equipos generan 20.88 renovaciones de aire por hora (lo que equivale a 0,348 renovaciones por minuto).

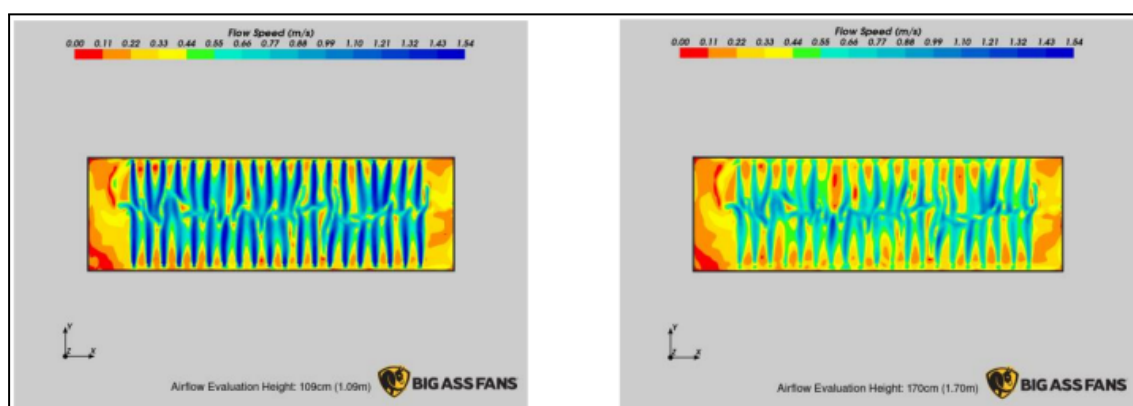


Figura 10. Flujo de inyección de aire al interior de la nave (a diferentes alturas).

De esta manera, el aire al interior de la planta EW se renueva completamente cada 3 minutos. Asumiendo que la planta posee un caudal capaz de contaminar el aire en un plazo de 10 minutos (es decir, la concentración final de ácido en el aire alcanza los 0,105 [mg/m³] en 10 minutos), la concentración máxima esperada no supera los 0,03 [mg/m³].

III. Aplicar RustGrip® al interior y exterior de la nave para evitar el desgaste natural de los aceros que la conforman.

A pesar de que la concentración de ácido al interior de la nave se verá reducida en un 89% (pasando de 0,27 a 0,03 [mg/m³]), sigue existiendo el desgaste natural de los aceros por las condiciones climáticas adjuntas en la tabla 3. Para evitar mantenciones de este tipo se pretende utilizar RustGrip® en el manto interior y exterior de la nave, considerando además elementos estructurales críticos (pilares, cerchas y costaneras), los cuales se muestran en la siguiente figura:

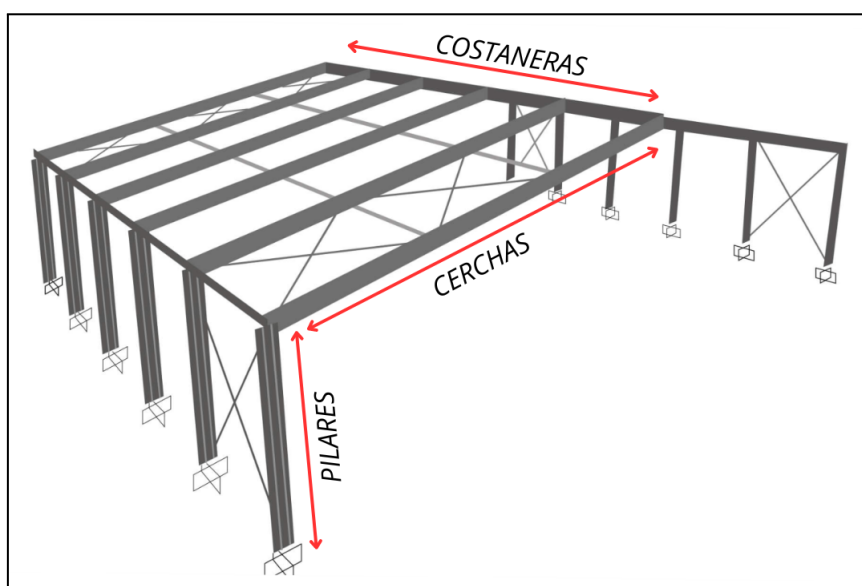


Figura 11. Elementos estructurales críticos de un galpón.

Fuente: Nuble Aceros (modificado).

Debido a la falta de información en la data para el cálculo preciso del área a intervenir, y en conjunto con la metodología adoptada por la empresa para evitar una subestimación de insumos, se considerará que el área de los elementos estructurales críticos corresponde al 30% del área del manto interior.

Siguiendo con el cálculo, las dimensiones de la nave EW presentadas en la tabla 4 se sintetizan en la siguiente figura:

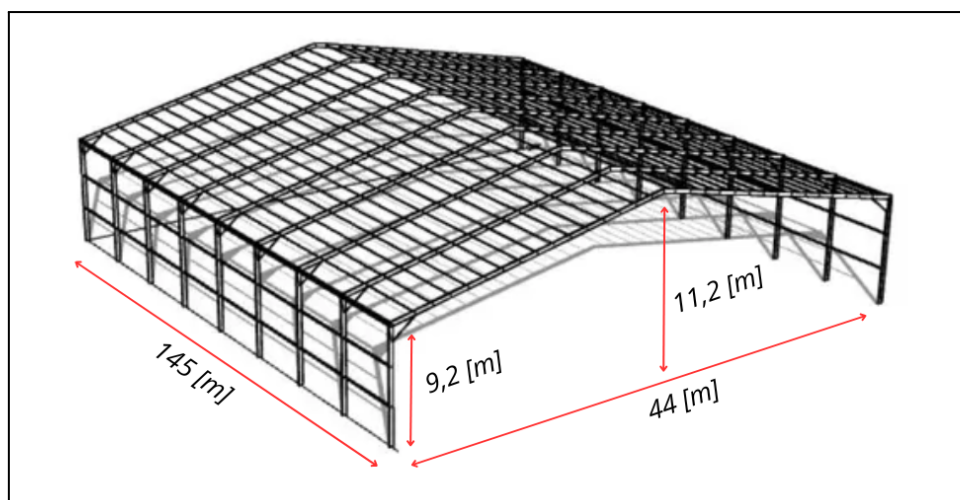


Figura 12. Dimensiones de la nave EW.

Fuente: Bibliocad (modificado).

Para simplificar los cálculos del área a revestir no se consideran las aberturas de la nave, obteniéndose los siguientes resultados para cualquiera de los mantos (interior o exterior):

Zona	Área [m ²]
Paredes laterales	2.668
Pared frontal y trasera	900
Cubierta (techo)	6.409
Total (A_{I/E})	9.977

Tabla 5. Área total del manto interior o exterior.

De esta manera, el área total a revestir está determinada por

$$A_T = 2 \cdot A_{I/E} + A_{PILARES} + A_{CERCHAS} + A_{COSTANERAS} \quad (2)$$

Donde,

A_T : Área total [m²].

$A_{I/E}$: Área total del manto interior o exterior [m²].

$A_{PILARES}$: Área total de los pilares [m²].

$A_{CERCHAS}$: Área total de las cerchas [m²].

$A_{COSTANERAS}$: Área total de las costaneras [m²].

Sin embargo,

$$A_{PILARES} + A_{CERCHAS} + A_{COSTANERAS} \approx 0,3 \cdot A_{I/E} \quad (3)$$

Por lo tanto,

$$A_T = 2,3 \cdot A_{I/E} \quad (4)$$

Debido a que RustGrip® tiene un rendimiento de 50 [m²] por tineta en sustratos metálicos, se requieren 459 tinetas para cubrir toda la estructura de la nave (lo que corresponde a $A_T = 22.947$ [m²]). Esto permitirá entregar una vida útil adicional de –al menos– 20 años⁶ a la nave EW.

7. EVALUACIÓN ECONÓMICA

La evaluación económica de la solución propuesta requiere de estimar los costos asociados a la inversión en equipos y su aplicación. Para no entrar en cálculos anexos al propósito del presente informe, sólo se consideran los costos de inversión, mano de obra y maquinaria necesaria, por lo que en la realidad el presupuesto presentado debe ser ajustado teniendo en cuenta el detalle de variables que no se consideran.

7.1. COSTOS DE INVERSIÓN

Con la finalidad de esclarecer la magnitud de la inversión a realizar en equipos y revestimientos, a continuación se presentan los costos de adquisición de insumos:

	Desestratificación (PowerFoil D)	Renovación (YellowJacket)	Protección (RustGrip®)
Consumo energético (por unidad)	1 [kWh]	0,4 [kWh]	-
Mantenimiento	-	-	-
Valor unitario	332 UF + IVA	170 UF + IVA	25,23 UF + IVA
Unidades necesarias	12	40	459
Valor total	3.984 UF + IVA	6.800 UF + IVA	11.581 UF + IVA
Inversión total	22.365 UF + IVA		

Tabla 6. Costos de la solución y otros gastos a considerar (consumo energético y mantenciones).

Fuente: BETABAF.

⁶ Este dato es entregado por las certificaciones del producto.

7.2. COSTOS DE APLICACIÓN

Para estimar la evaluación económica de la aplicación se requiere analizar cada etapa del diseño de solución por separado.

- Aplicación de 12 PowerFoil D (Desestratificación):

La aplicación de ventiladores HVLS en la cubierta de la nave considera la utilización de andamios montados al puente grúa para alcanzar los 11,2 [m²] de altura al eje. Además, la instalación requiere cuadrillas compuestas por:

- 3 Andamieros.
- 3 Montajistas mecánicos.
- 1 Ayudante de instalación.
- 1 Eléctrico.
- 1 Supervisor de obras.
- 1 Prevencionista de riesgos.
- 1 Administrador de contratos.

- Aplicación de 40 YellowJacket (Renovación):

La instalación de cada ventilador direccional requiere de un equipo alzhombres al exterior de la nave y andamios al interior (ambos ubicados a 2,5 metros de altura). De esta manera, se necesita una cuadrilla conformada por:

- 3 Andamieros.
- 3 Montajistas mecánicos.
- 1 Ayudante de instalación.
- 1 Eléctrico.
- 1 Supervisor de obras.
- 1 Prevencionista de riesgos.
- 1 Administrador de contratos.

- Aplicación de XX [m²] de RustGrip® (Protección):

Previo a la aplicación del revestimiento se debe realizar un hidrolavado a alta presión para eliminar todos aquellos elementos ajenos al sustrato que se desea proteger. La aplicación de RustGrip® se realizará mediante equipo airless, siendo necesarios equipos alzhombres por el exterior de la nave y andamios por el interior. Las cuadrillas necesarias para la aplicación están conformadas por:

- 2 Andamieros.
- 3 Aplicadores.
- 1 Operador de grúa (o equipo alzahombres).
- 1 Ayudante de aplicación.
- 1 Supervisor de obras.
- 1 Prevencionista de riesgos.
- 1 Administrador de contratos.

Dicho esto, el costo de la mano de obra necesaria para la aplicación de la solución se sintetiza en la tabla 8, mientras que la cantidad de personas necesarias se fundamenta en la sección de desarrollo del proyecto.

Labor	Sueldo [UF]	Cantidad de personas	Total [UF]
Andamieros	30	6	180
Montajistas mecánicos	35	9	315
Ayudante de instalación	25	3	75
Eléctrico	40	1	40
Aplicadores	40	6	240
Ayudante de aplicación	25	2	50
Operador de grúa	35	2	70
Supervisor de obras	42	1	42
Prevencionista de riesgos	40	1	40
Administrador de contratos	150	1	150
Total [UF]			1.202

Tabla 7. Sueldo base de la mano de obra necesaria para la implementación de la solución.

Fuente: Betapaint (referencia de trabajos realizados con anterioridad llevados a la fecha).

7.3. OTROS COSTOS

Además de los costos asociados a la mano de obra, se deben considerar los costos de los equipos necesarios. Estos se presentan en la siguiente tabla:

Equipo	Costo [UF]	Cantidad necesaria	Total [UF]
Andamios Layher (100 cuerpos)	465 + IVA	2	930 + IVA
Equipos alzhombres 12 [m] (*)	100 + IVA	2	200 + IVA
Equipo Airless	65 + IVA	6	390 + IVA
Hidrolavadora	25 + IVA	2	50 + IVA
Total [UF]			1.570 + IVA

Tabla 8. Costos de equipos necesarios para la implementación de la solución.

(*) Corresponde a equipos en arriendo por el periodo que dure la aplicación.

Se asume que Minera El Abra proporcionará los recursos necesarios (agua y energía) para la correcta implementación de la solución.

8. METODOLOGÍAS

La metodología utilizada en la ejecución del proyecto se basa en el modelo de cascada, la cual consiste en la realización de tareas de manera escalonada y en orden secuencial (para más detalles del modelo, ver anexo 9). Dicho esto, a continuación se presenta el cómo se logrará cada uno de los objetivos específicos propuestos al inicio del presente informe:

8.1. Cuantificar las pérdidas asociadas a los paros operacionales producto del mantenimiento programado en la planificación actual de la nave EW.

Debido a que Betapaint® es una empresa ajena a Minera El Abra y no se tiene acceso directo a su base de datos, se debe solicitar información respecto al número de paros operacionales proyectados en su planificación minera actual para la nave EW. Una vez obtenido el número de paros operacionales proyectados a largo plazo, se deben cuantificar las pérdidas asociadas por efecto del mantenimiento programado. Para ello, se requiere identificar la capacidad de producción diaria de la nave, la duración del paro, el precio de venta del producto final y el costo de la mantención en sí. Todos estos datos son entregados por el mandante para estudiar la viabilidad de implementar soluciones que optimicen el número de paros

operacionales, y en efecto, disminuyan las pérdidas asociadas. Es importante notar que este valor no cuantifica el costo del mantenimiento como tal, sino que cuantifica el costo que significa para Minera El Abra parar la producción durante un determinado periodo de tiempo.

8.2. Relacionar el tiempo de vida útil de los activos mineros estructurales con las concentraciones de ácido sulfúrico presentes en el ambiente de la nave EW.

Teniendo en consideración que la vida útil de los activos estructurales metálicos disminuye en el tiempo a mayores concentraciones de ácido sulfúrico (pues se corroen), se busca analizar empírica y experimentalmente la dependencia entre estas variables. Para ello, lo primero es solicitar a Minera El Abra sus estimaciones sobre la tasa de corrosión en función de un determinado valor en las concentraciones de ácido sulfúrico en el ambiente. Con esta información se busca corregir el modelo matemático para posteriormente realizar variaciones de concentración, verificando así su impacto teórico en la vida útil de los activos mineros estructurales.

8.3. Simular la disminución de ácido sulfúrico en la nave EW con la incorporación de ventiladores direccionales y tecnología HVLS.

Dado que en Mayo de 2022 Betapaint® emitió un informe a Minera El Abra –el cual estudia la factibilidad técnica de implementar un sistema de desestratificación y renovación de aire a través de ventiladores direccionales y tecnología HVLS para disminuir las concentraciones de ácido sulfúrico en su planta EW– se utilizarán estos resultados como antecedente para validar la propuesta de solución, y sobre esto, realizar el estudio económico para verificar la factibilidad de su implementación.

8.4. Medir el impacto sobre la vida útil de los activos estructurales metálicos al disminuir las concentraciones de ácido en el aire y al reforzar el sustrato expuesto mediante la aplicación de RustGrip®.

Una vez obtenida la nueva concentración de ácido sulfúrico en el aire de la nave EW (implementada la solución), se procede a determinar su impacto en la vida útil de los activos estructurales metálicos a través de relaciones empíricas. Junto a ello, al aplicar RustGrip® como revestimiento anticorrosivo (el cual consiste en una inyección de aluminio para generar protección sobre el sustrato), el espesor y la resistencia de las estructuras metálicas aumentará permitiendo así una mayor vida útil.

8.5. Contrastar las pérdidas producidas por paros operacionales y el costo de implementar la solución para así justificar su viabilidad a largo plazo.

Una vez corroborada la eficiencia de la solución propuesta mediante simulaciones y relaciones empíricas, se busca determinar el impacto económico de su implementación. Debido a que el valor de las pérdidas por paros operacionales fue calculado en un principio, éste se debe contrastar con el costo de la solución para así determinar la viabilidad del proyecto y verificar si efectivamente optimiza los costos de mantenimiento (el cual considera únicamente las pérdidas por paros operacionales).

9. MEDIDAS DE DESEMPEÑO

Para evaluar cuantitativamente el cumplimiento de cada uno de los objetivos específicos descritos en el inciso anterior, se presentan las siguientes medidas de desempeño:

9.1. Pérdida por paros operacionales programados:

$$PPO = CPD \cdot D \cdot P \quad (5)$$

Donde,

PPO: Pérdida por paros operacionales [US\$].

CPD: Capacidad de producción diaria [lb/días].

D: Duración del paro [días].

P: Precio de cátodos [US\$/lb].

Debido a que se proyecta una determinada cantidad de paros operacionales con cierta periodicidad para alargar la vida útil de la nave EW, se debe llevar el valor de cada PPO a la fecha. Para ello se utilizará la conversión más reciente de US\$ a UF.

9.2. Tiempo de vida útil de activos estructurales mineros metálicos:

$$t_{VU} = (E_i - E_{\min}) / v_{CORR} \quad (6)$$

Donde,

t_{VU} : Tiempo de vida útil [años].

E_i : Espesor inicial del activo [mm].

E_{\min} : Espesor mínimo de seguridad [mm].

v_{CORR} : Velocidad (o tasa) de corrosión [mm/año].

Si la velocidad o tasa de corrosión no se encuentra determinada por Minera El Abra, se debe calcular mediante la ecuación:

$$v_{\text{CORR}} = (K \cdot W) / (\rho \cdot A \cdot t) \quad (7)$$

Donde,

v_{CORR} : velocidad de corrosión [mm/a]

K: constante que otorga las unidades a v_{CORR} . $K = 8.76 \cdot 10^4$.

W: pérdida de masa del metal [g].

ρ : densidad del metal [g/cm³].

A: área afectada o corroída [cm²].

t: tiempo de exposición a la corrosión [h].

Ahora bien, en la industria minera, el tiempo de vida útil de los activos estructurales mineros es determinado por un tercero. Por lo general, los encargados de realizar esta labor son las empresas de ingeniería tales como “Procure”, “R&Q”, “Ecora” y “Bechtel” (por nombrar algunas). Por otra parte, tal y como fue mencionado en metodologías, una vez aplicada la solución existirá una disminución en la v_{CORR} producto de la disminución en las concentraciones de ácido sulfúrico, y además, un aumento en espesor inicial de los activos estructurales metálicos por efecto del revestimiento RustGrip®. De esta manera, esta medida de desempeño permitirá medir los objetivos específicos II y IV.

9.3. Disminución porcentual en la concentración de ácido sulfúrico en la nave EW

$$\%D(\text{H}_2\text{SO}_4) = [C_f / C_i] \cdot 100 \quad (8)$$

Donde,

$\%D(\text{H}_2\text{SO}_4)$: Disminución de ácido en la nave EW [%].

C_f : Concentración final de ácido (implementada la solución) [mg/m³].

C_i : Concentración inicial de ácido [mg/m³].

Esta medida de desempeño permitirá cuantificar la eficiencia de implementar ventiladores direccionales y tecnología HVLS para desestratificar y renovar el aire de la nave EW, midiendo así el desempeño del objetivo específico III. Para que la solución sea considerada un éxito, se pretende disminuir las concentraciones de ácido sulfúrico –al menos– al 50% para así duplicar los períodos de mantención.

9.4. Delta costos

$$\Delta C = \Sigma VP_{PPO} - C_{SOL} \quad (9)$$

Donde,

ΔC : Beneficio de disminuir las concentraciones de H_2SO_4 [US\$].

ΣVP_{PPO} : Total de pérdidas por paros operacionales [US\$].

C_{SOL} : Costo de implementar la solución [US\$].

En resumen, en la siguiente tabla se relaciona cada objetivo específico junto a su respectiva medida de desempeño:

OBJETIVO ESPECÍFICO	MEDIDA DE DESEMPEÑO
I. Cuantificar las pérdidas asociadas a los paros operacionales producto del mantenimiento programado en la planificación actual de la nave EW.	$PPO[US\$] = CPD \cdot D \cdot P$
II. Relacionar el tiempo de vida útil de los activos mineros estructurales con las concentraciones de ácido sulfúrico presentes en el ambiente de la nave EW.	$t_{VU}[años] = (E_i - E_{mín}) / v_{CORR}$
III. Simular –mediante el software SpecLab® y modelación dinámica– la disminución de ácido sulfúrico en la nave EW con la incorporación de ventiladores direccionales y tecnología HVLS.	$D(H_2SO_4) [\%] = [C_f / C_i] \cdot 100$
IV. Medir el impacto sobre la vida útil de los activos estructurales metálicos al disminuir las concentraciones de ácido en el aire y al reforzar el sustrato mediante la aplicación de RustGrip®.	$t_{VU}[años] = (E_i - E_{mín}) / v_{CORR}$
V. Contrastar las pérdidas producidas por paros operacionales y el costo de implementar la solución para así justificar su viabilidad a largo plazo.	$\Delta C[US\$] = \Sigma VP_{PPO} - C_{SOL}$

Tabla 9. Síntesis de objetivos específicos junto a su respectiva medida de desempeño.

10. DESARROLLO DEL PROYECTO

En primer lugar, convengamos que la minería es una industria poco flexible a la hora de intervenir en su normal funcionamiento pues está condicionada por las metas de producción esperadas. Es por ello que el plan de implementación debe ser dinámico dependiendo de las condiciones variables del mandante. Debido a que –por la magnitud económica de la inversión y otros factores ajenos a Betapaint®– Minera El Abra aún no autoriza la ejecución del proyecto, y por lo tanto, las condiciones de su implementación son inciertas; se asumirá un escenario realista esperado para construir en base a esto el plan de implementación.

Si bien lo ideal sería ingresar con varias cuadrillas y avanzar en simultáneo, se priorizará la cosecha de cátodos para mantener la continuidad operacional. En este sentido, ingresarán 2 cuadrillas para la instalación de ventiladores direccionales y 1 cuadrilla para la instalación de ventiladores HVLS. Las cuadrillas encargadas de la instalación de ventiladores direccionales no interfieren de manera significativa con la operación, así que operarán con normalidad a una tasa esperada de 1,5 [ventiladores/jornada]. Sin embargo, la instalación de ventiladores HVLS está condicionada por el recorrido del puente grúa. En detalle, se utilizarán 2 niveles de andamios sobre el puente grúa para instalar los ventiladores HVLS a tasa de 1 ventilador cada 8 horas. Dependiendo de la planificación de cosecha de cátodos, se irá avanzando de manera paulatina y simultánea en los 12 ventiladores HVLS que requieren ser instalados. Por otra parte, los ventiladores direccionales serán instalados mediante la ayuda de equipos alzhombres por el exterior y andamios por el interior, iniciando con el sector oriente para finalizar con el sector poniente.

Referente a la aplicación de RustGrip® como protección al sustrato expuesto a las condiciones ambientales, los trabajos comenzarán con las paredes frontales y traseras de la nave ya que estas no están condicionadas por la instalación de ventiladores. Para ello ingresarán 2 cuadrillas, cada una encargada de la aplicación de sector (tanto del interior como del exterior). Una vez terminada la instalación de los ventiladores direccionales en el sector oriente, ingresarán las 2 cuadrillas para avanzar simultáneamente en las paredes internas y externas de las paredes laterales del galpón a una tasa esperada de 1000 [m²/jornada]. Debido a que los trabajos en andamios se pueden realizar hasta los 10 metros de altura, no habría problema en utilizarlos para la aplicación interior y exterior de la nave. Finalmente, para la cubierta interna se necesitará nuevamente el puente grúa para un avance paulatino, por lo que será lo último en aplicarse.

De esta manera, según las tasas de aplicación y el número de cuadrillas, se espera una duración de 21 días de trabajo. La planificación por día se resume en la siguiente Carta Gantt:

LABOR	DÍA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1 MONTAJE DE ELEMENTOS PARA LA INSTALACIÓN																						
2 INSTALACIÓN DE VENTILADORES HVLS																						
2.1 Instalación física de ventiladores HVLS.																						
2.2 Instalación del cableado eléctrico.																						
3 INSTALACIÓN DE VENTILADORES DIRECCIONALES																						
3.1 Instalación física de ventiladores direccionales lado oriente.																						
3.2 Instalación del cableado eléctrico lado oriente.																						
3.3 Instalación física de ventiladores direccionales lado poniente.																						
3.4 Instalación del cableado eléctrico lado poniente.																						
4 APLICACIÓN DEL REVESTIMIENTO RUSTGRIP																						
4.1 Aplicación del producto en paredes frontales (interior y exterior).																						
4.2 Aplicación del producto en paredes traseras (interior y exterior).																						
4.3 Aplicación del producto en paredes laterales lado oriente (interior y exterior).																						
4.4 Aplicación del producto en la cubierta externa.																						
4.5 Aplicación del producto en paredes laterales lado poniente (interior y exterior).																						
4.6 Aplicación del producto en la cubierta interna.																						

Tabla 10. Carta Gantt del plan de aplicación del proyecto.

11. RESULTADOS

11.1. Pérdidas por paros operacionales programados

Tal y como fue mencionado al inicio del presente informe, Minera El Abra considera el mantenimiento preventivo de estructuras corroídas cada 5 años, generando un paro operacional programado con una duración de 45 días corridos: 20 para el sector este y 25 para el sector oeste (pues la operación nunca se detiene completamente).

Tomando como referencia las cifras de 2022, Minera El Abra alcanzó una producción anual de 91.649 toneladas métricas de cobre, lo que equivale al 40,4% de la capacidad de producción de la planta EW. Asumiendo que la producción se distribuye de manera uniforme en los 365 días del año, se obtiene una producción diaria de 251 toneladas métricas de cobre, lo que equivale 553.560 [lb/día].

Debido a que la operación disminuye su productividad al 50% durante los 45 días del periodo de mantención, las pérdidas por paros operacionales están determinadas por la ecuación (3), donde:

$$PPO = (553.560 \text{ [lb/día]} \cdot 0,5) \cdot 45 \text{ [días]} \cdot 3,729 \text{ [US$/lb]}^7 = 46.445.065 \text{ [US\$]}$$

Es decir, cada 5 años se debe realizar una mantención que involucra la pérdida de 46.445.065 [US\$] sólo por parar parcialmente la operación, sin considerar el costo que involucra la mantención como tal.

⁷ Actualizado al 07 de Diciembre, 2023; en <http://www.portalminero.com/x/HwHoAQ>.

11.2. Tiempo de vida útil de activos mineros estructurales

Según la información obtenida por el mandante, cuando las estructuras pierden el 20% de su espesor deben ser reemplazadas producto del riesgo de colapso estructural. Esto ocurre en un plazo de 5 a 7 años, salvo que se desarrollen tareas de mantenimiento. Para efectos de cálculo, se considera que una concentración de 0,5 [mg/m³] deteriora el 20% del espesor en 7 años (lo cual es muy cercano a la realidad). Por otra parte, en un plazo de 10 años se cumple la vida útil de la nave. Las tareas actuales de mantención otorgan 5 años de vida útil adicional, por ello el periodo de mantenimiento.

No se obtuvo información respecto a la velocidad de corrosión actual de la nave ni tampoco sobre los espesores, por lo que esta medida de desempeño no pudo ser determinada con precisión.

11.3. Disminución de ácido en la nave EW

A través de las simulaciones realizadas en SpecLab® (las cuales fueron comentadas en el diseño de solución), el sistema de desestratificación y renovación de aire permitirá una concentración final de ácido igual a 0,03 [mg/m³]. Utilizando la ecuación (8), se tiene que:

$$D(\text{H}_2\text{SO}_4) [\%] = (0,03 / 0,27) \cdot 100$$

$$D(\text{H}_2\text{SO}_4) = 11,1\%$$

Este resultado nos indica que la concentración de ácido en el aire se reducirá al 11,1% en contraste con el escenario actual (sin solución). Dicho en otras palabras, la concentración de neblina ácida se verá reducida en un 88,9% con la implementación de la solución propuesta.

11.4. Impacto de la disminución en la concentración sobre el tiempo de vida útil

Notemos que, con una concentración de 0,27 [mg/m³], Minera El Abra realiza mantenciones preventivas cada 5 años. Asumiendo una relación lineal entre estas variables, y debido a que –una vez implementada la solución– la concentración de ácido en el aire disminuye a la novena parte ($C_i/9 = 0,03$ [mg/m³]), se infiere que la periodicidad de las mantenciones aumentan a la novena parte también (esto se debe validar mediante el tiempo de vida útil). Es decir, con una concentración de 0,03 [mg/m³] las mantenciones preventivas deben ocurrir cada 45 años. Sin embargo, debido a que la vida útil de los activos mineros estructurales no están condicionados

únicamente por los ataques corrosivos de la neblina ácida, se debe tener en cuenta las condiciones ambientales en donde se ubica la nave EW (ver tabla 3).

Para lograr que las mantenciones se realicen cada 45 años, se aumentarán los espesores del galpón en 0,3 [mm] con el revestimiento (1,5 [mm] en cada manto, exterior e interior). Debido a que RustGrip® posee una serie de certificaciones que avalan su resistencia mecánica, galvánica y abrasiva; la velocidad de corrosión disminuirá considerablemente asegurando la protección del sustrato en el tiempo objetivo. Para cuantificar cuánto será con exactitud la disminución en la velocidad de corrosión se deben realizar mediciones de laboratorio simulando las condiciones en donde opera el revestimiento, lo cual escapa de las herramientas que posee Betapaint®.

11.5. Contraste entre el costo de la solución y las pérdidas programadas

Como fue mencionado anteriormente, una vez implementada la solución, la periodicidad de las mantenciones preventivas se realizan cada 45 años. Esto implica la evasión de 9 mantenciones que involucra el sistema actual. Llevado a unidades monetarias, las pérdidas por paros operaciones (PPO) durante un periodo de 45 años es de 418.005.581 [US\$], en contraste con los 1.055.199 [US\$] (25.137 [UF], sin considerar IVA) que cuesta la solución aplicada. De esta manera, utilizando la ecuación (9), el $\Delta C = 416.950.382$ [US\$]. Es decir, implementar un esquema de solución que permita reducir las concentraciones de neblina ácida al interior de la nave y a la vez proteja el sustrato expuesto a las condiciones ambientales, es un 99,75% más económico que parar la operación a la mitad de su producción 9 veces en un periodo de 45 años por mantenciones estructurales, sin siquiera considerar el costo de la mantención en sí.

Es muy probable que, en la realidad, el costo de aplicación aumente hasta 5 veces más. Sin embargo, sigue siendo considerablemente menor en comparación a la pérdida de capacidad de producción.

12. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

En primer lugar, el problema raíz por el cual Minera El Abra solicitó el estudio a Betapaint® fue para disminuir las concentraciones de neblina ácida al interior de la nave EW. Esto puede ser realizado únicamente por el sistema de destratificación y renovación de aire concebido por los ventiladores HVLS y direccionales respectivamente. Sin embargo, añadir el revestimiento RustGrip® para proteger las

estructuras expuestas es un esquema de solución mucho más integral y duradero si el objetivo es maximizar los períodos de mantención sin la necesidad de recurrir a paros operacionales. Ahora bien, cualquiera de los métodos (ya sea el sistema de ventilación o protección de activos mediante revestimiento) es fácilmente una solución independiente que permitirá mejorar el tiempo de vida útil de los activos mineros estructurales. La elección de aplicar el esquema de solución completo o cualquiera de las partes es decisión del mandante, pero sin duda, en caso de elegir una de las partes, la inversión a realizar será considerablemente menor al paro parcial de la operación.

En segundo lugar –y principalmente enfocado en el plan de implementación–, el presente estudio es una simplificación de la realidad debido a la incapacidad de gestionar un proyecto de tal magnitud de manera independiente. La logística que hay detrás y la ingeniería de detalle no es menor, por lo que se debe tener un equipo de trabajo con experiencia para mitigar los riesgos y realizar una implementación exitosa. No obstante, los órdenes de magnitud están justificados y no debieran cambiar significativamente, por lo que el estudio puede ser considerado una buena aproximación. Ahora bien, en caso de querer llevar a cabo el proyecto se deben realizar una serie de ajustes al presupuesto, principalmente ligados a variables que no fueron consideradas (transporte de material, combustible, viáticos para los trabajadores, términos de contrato, etc).

En tercer lugar, la falta de datos siempre es un impedimento para lograr a cabalidad los objetivos específicos planteados al inicio del proyecto. En ese sentido, se debe tener una comunicación directa y fluida con el mandante para solicitar información y medir oportunamente las variables requeridas que permiten medir cuantitativamente y validar el impacto de la solución. En particular, para el presente proyecto lo ideal hubiese sido tener acceso directo a los flujos de caja para demostrar mediante indicadores financieros el beneficio económico y rentable de implementar el esquema de solución propuesto.

Finalmente, se debe tener en cuenta que la neblina ácida es un fenómeno común en las plantas de electroobtención de cobre, el cual es tratado comúnmente por soluciones tradicionales (aditivos actuando en conjunto con esferas de polipropileno). Debido a la similitud en el funcionamiento de las plantas de electroobtención en Chile, la solución propuesta –y validada– puede ser fácilmente modificada en sus condiciones iniciales para ser aplicada en cualquier otra planta EW. De esta manera, la solución propuesta no solo asegura una calidad técnica y

duradera, sino que también permite una versatilidad sin fronteras. Además, al tener como objetivo maximizar la vida útil de los activos mineros estructurales ya existentes, la solución promueve una minería verde, evitando así la generación de nuevos residuos.

REFERENCIAS

- [1] Al impacto directo, R. (s/f). Rust Grip® control corrosión: Betapaint.cl. Recuperado el 24 de octubre de 2023, de <https://www.betapaint.cl/wp-content/uploads/2023/10/Rust-Grip-Ficha-Tecnica.pdf>
- [2] AMCA System - Soluciones Neblina Acida. (s/f). Amcasys.com. Recuperado el 13 de octubre de 2023, de <https://www.amcasys.com/soluciones-neblinaacida.html>
- [3] Asana. (2023, mayo 14). Las 12 metodologías más populares para la gestión de proyectos. Asana. <https://asana.com/es/resources/project-management-methodologies>
- [4] Disipan la Neblina. (s/f). Induambiente.com. Recuperado el 3 de noviembre de 2023, de <https://www.induambiente.com/especial/mineria/disipan-la-neblina>
- [5] El Abra. (s/f). El Abra. Recuperado el 28 de agosto de 2023, de <https://www.elabra.cl/el-abra>
- [6] Electrolítica, L. P. P., Electrodeposición, C. C. C. E., De los procedimientos actuales más sencillos para recuperar, es U., Pura y selectiva, en F., & solución., M. Q. se E. (s/f). "Obteniendo la máxima pureza. Codelcoeduca.cl. Recuperado el 29 de agosto de 2023, de https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005004/electroobtencion_media_t_cnico_060119.pdf
- [7] Eliminando las neblinas ácidas en EW - Minería Chilena. (s/f). Minería Chilena. Recuperado el 28 de agosto de 2023, de <https://www.mch.cl/reportajes/eliminando-las-neblinas-acidas-en-ew/>
- [8] Lagos, G., Alvear, G., Risopatrón, C., Urzúa, O., Reyes, L., Bande, J., Parada, R., Cariato, J., & Aguilera, P. (s/f). Cobre refinado. Cesco.cl. Recuperado el 24 de agosto de 2023, de <https://www.cesco.cl/wp-content/uploads/2021/07/Cobre-refinado.-Un-buen-negocio-para-Chile.pdf>

- [9] No, D. S. (s/f). Ist.cl. Recuperado el 31 de agosto de 2023, de <https://www.ist.cl/wp-content/uploads/2016/08/DECRETO-SUPREMO-594-ACTUALIZADO-2019.pdf>
- [10] Riquelme, S. (2020, julio 20). Exportar cobre refinado es un buen negocio. Guía Minera de Chile. <https://www.guiaminera.cl/exportar-cobre-refinado-es-un-buen-negocio/>
- [11] Sistema de captura de neblina ácida. (s/f). Metso. Recuperado el 13 de octubre de 2023, de <https://www.metso.com/es/portafolio/sistema-de-captura-de-neblina-acida/>
- [12] Villar, R., & Carola, J. (s/f). Diseño e implementación de una planta piloto semiindustrial de electroobtención de cobre. Usm.cl. Recuperado el 16 de octubre de 2023, de <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/55620/m19336617-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [13] (S/f). Cecoenviro.com. Recuperado el 13 de octubre de 2023, de <https://www.cecoenviro.com/es/productos/filtros-de-lecho-de-fibra-o-de-vela/>
- [14] (S/f-a). Consejominero.cl. Recuperado el 24 de agosto de 2023, de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2023/07/Cifras-Actualizadas-de-la-Mineria-2023-Julio.pdf>
- [15] (S/f-b). Codelcoeduca.cl. Recuperado el 25 de agosto de 2023, de https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005316/lixiviacion_media_t_cnico_080119.pdf
- [16] (S/f-c). Multimedia.3m.com. Recuperado el 31 de agosto de 2023, de <https://multimedia.3m.com/mws/media/153060O/fichatecnica.PDF>

ANEXOS

1. Flujo operacional de minera El Abra

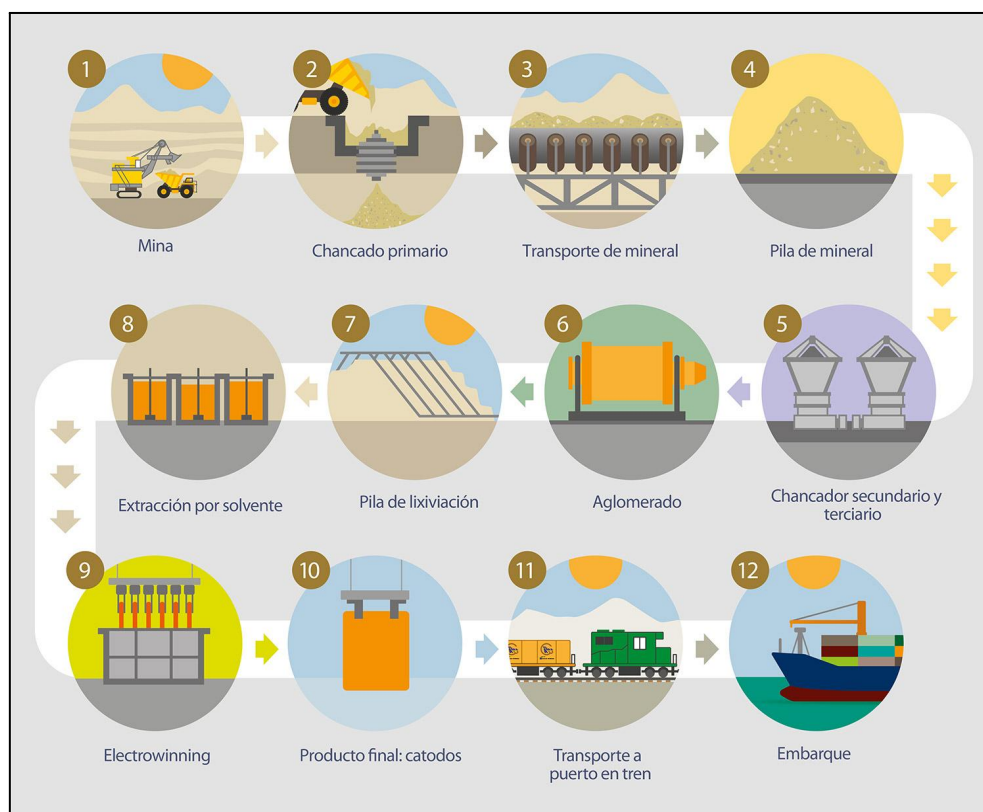


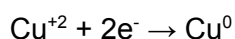
Figura 13. Diagrama del flujo operacional utilizado por El Abra.

Fuente: El Abra.

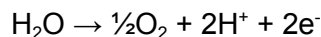
2. Electroquímica del cobre

En la electroobtención, el cobre metálico se recupera por electrólisis a partir de una solución altamente ácida de sulfato de cobre (CuSO_4). El proceso de electrólisis se logra haciendo pasar una corriente eléctrica continua entre los electrodos (ánodos inertes pero conductivos, y cátodos), los cuales están sumergidos en un electrolito rico en cobre (CuSO_4 , H_2SO_4 y H_2O).

El ánodo lleva carga eléctrica positiva y el cátodo, carga eléctrica negativa. Los iones de cobre (Cu^{+2}) son reducidos, es decir neutralizados en el cátodo por los electrones que fluyen en él, depositándose una capa de cobre metálico sobre la superficie de la plancha madre de acero inoxidable (cátodo permanente). La reacción de deposición electrolítica en el cátodo es:



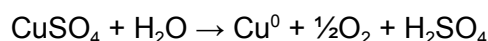
Por otro lado, la reacción en el ánodo es completamente diferente. El gas oxígeno se forma en el ánodo inerte por la descomposición del agua. Los iones sulfato (SO_4^-) se neutralizan en el ánodo formando inmediatamente ácido sulfúrico (H_2SO_4) y oxígeno (O_2) según la siguiente reacción:



Por lo tanto, la reacción global queda definida por:



El oxígeno producido en la reacción anterior escapa como gas en el ánodo. Luego, la reacción neta para una celda es:



Fuente: "Procesos de electroobtención de cobre", Roberto Alfaro.

3. D.S. N°594: REGLAMENTO SOBRE CONDICIONES SANITARIAS Y AMBIENTALES BÁSICAS EN LOS LUGARES DE TRABAJO

El artículo 66 del decreto supremo 593 establece una concentración máxima permitida (Límite Permissible Ponderado, LPP) de 0,88 [mg/m^3], dato al cual se le debe considerar la corrección por la altura geográfica, la cual viene definida en el artículo 63, bajo la siguiente fórmula:

$$F_a = P/760$$

Donde F_a es el factor de corrección y P es la presión atmosférica medida en milímetros de mercurio [mmHg].

Considerando que la planta de procesamiento de mineral se encuentra a 15 km al sudeste de la mina, a una altitud de 3.300 m.s.n.m. aproximadamente, se calcula P mediante la fórmula:

$$P [\text{mbar}] = 1013.25 \cdot (1 - 0.0000225577 \cdot H)^{5.2559}$$

Donde H es la altura medida en metros. Para realizar la conversión de [mbar] a [mmHg] se utiliza:

$$P [\text{mmHg}] = P [\text{mbar}] \cdot 9/12$$

En paralelo, el artículo 62 establece una corrección cuando la jornada laboral sobrepase las 8 horas de exposición diaria, justificada en el mayor tiempo de exposición a la neblina ácida y menor tiempo de recuperación disponible. Dicha corrección viene establecida por la siguiente fórmula:

$$F_j = (8/h) \cdot [(24-h)/16]$$

Donde F_j corresponde al factor de corrección ajustado, y h representa el número de horas trabajadas.

La planta opera con jornadas de trabajo 7x7, con una extensión diaria de 12 horas, de las cuales solo 10 de ellas son a exposición de neblina ácida, obteniendo el siguiente resultado:

LPP CAS 764-93-9	F_a - Corrección altura geográfica	F_j - Corrección jornada laboral	LPP aplicable a planta EW
0,88 [mg/m ³]	0,67	0,7	0,41 [mg/m ³]

Tabla 11. Cálculo de LPP aplicable con jornada laboral de 10 horas.

No obstante, si bien la corrección de la jornada laboral es de 10 horas, el mandante basa su cálculo en las 12 horas contratadas por jornada, modificando el LPP aplicable según el siguiente detalle:

LPP CAS 764-93-9	F_a - Corrección altura geográfica	F_j - Corrección jornada laboral	LPP aplicable a planta EW
0,88 [mg/m ³]	0,67	0,5	0,29 [mg/m ³]

Tabla 12. Cálculo de LPP aplicable con jornada laboral de 12 horas.

Así, El Abra establece un nivel de LPP corregido en 0,29 [mg/m³].

Fuente: BETABAF.

4. Aditivo FC-1100

Es un tensoactivo fluoroquímico especialmente diseñado para ser utilizado en la supresión de la neblina de ácido sulfúrico producida en la nave de electrodeposición de cátodos de cobre. El FC-1100 puede reducir significativamente los niveles de neblina ácida (tanto si se utiliza solo o en conjunto con barreras mecánicas), sin producir efectos adversos en los procesos de extracción por solvente ni de electroobtención. El FC-1100 contenido en el electrolito es absorbido por la interfase gas-líquido de la burbuja de oxígeno, actuando como

estabilizador. Las burbujas de gas ascienden hasta la superficie, coalescen, aumentan de tamaño, y drenan el electrolito en forma suave por sus paredes, reduciendo significativamente la cantidad de líquido expelido al ambiente cuando la burbuja –de tensión superficial reducida– se desvanece.

Fuente: Ficha técnica Fluorad^{MR} FC-1100: Agente Supresor de Neblina Ácida, 3M.

5. Espuma y neblina ácida

La formación de neblina ácida en las operaciones industriales está relacionada con la presencia de ácidos y partículas finas que pueden ser arrastradas por la espuma y liberadas al ambiente. En general, la formación de la neblina ácida a partir de la espuma involucra los siguientes procesos:

- *Generación de espuma:* En las operaciones industriales, la espuma se forma debido a la presencia de tensioactivos y agentes tensoactivos en el agua o el electrolito. Estos compuestos reducen la tensión superficial del líquido y permiten la formación de burbujas de gas en la superficie del líquido.
- *Atrapamiento de partículas:* A medida que la espuma se forma y se eleva a la superficie del líquido, puede atrapar partículas finas en suspensión, que incluyen compuestos metálicos, óxidos, hidróxidos y otros contaminantes presentes en el ambiente industrial. Estas partículas se adhieren a la superficie de las burbujas de gas y quedan atrapadas en la espuma.
- *Elevación de la espuma:* A medida que la espuma continúa su formación, las partículas atrapadas en la espuma se elevan junto con las burbujas de gas. La espuma actúa como un vehículo que transporta estas partículas hacia la superficie del líquido.
- *Rompimiento de la espuma:* A medida que la espuma alcanza la superficie del líquido, se rompe o colapsa. Cuando esto ocurre, las partículas atrapadas en la espuma quedan expuestas al ambiente circundante.
- *Liberación de partículas y ácidos:* Las partículas finas liberadas durante el rompimiento de la espuma, en combinación con la humedad en el aire, pueden formar aerosoles ácidos. Estos aerosoles pueden contener compuestos ácidos, como ácido sulfúrico (H_2SO_4) o ácido clorhídrico (HCl),

dependiendo de la naturaleza de la operación industrial y los contaminantes presentes.

- *Riesgos asociados:* Los aerosoles ácidos liberados al ambiente representan riesgos para la salud humana, el equipo y el medio ambiente. Pueden causar irritación en los ojos, la piel y el sistema respiratorio, así como daño a la vegetación y la fauna circundantes.

6. Tratamiento de aceros corroídos mediante el método tradicional de 3 pinturas

Este esquema de solución comienza con el método de granallado seguido de la aplicación de tres capas de pinturas (anticorrosiva, epóxica y de terminación), entregando un enfoque completo y efectivo para tratar aceros corroídos y proporcionar una protección duradera. Este proceso se utiliza comúnmente en la industria para la protección contra la corrosión en estructuras de acero y equipos expuestos a ambientes corrosivos. A continuación se detalla el procedimiento general de aplicación:

- 1) *Granallado (Shot Blasting):* Este es el primer paso del proceso. Implica el uso de una máquina de granallado para eliminar completamente la corrosión, pintura antigua y contaminantes de la superficie del acero. El granallado utiliza partículas abrasivas, como granallas de acero o abrasivos de granallado, que se disparan a alta velocidad contra la superficie. Esto crea una superficie limpia y rugosa, ideal para que las capas de pintura se adhieran de manera efectiva.
- 2) *Imprimación anticorrosiva:* Después de granallar, se aplica una capa de imprimación anticorrosiva. Esta imprimación es especialmente formulada para inhibir la corrosión y mejorar la adherencia de las capas de pintura posteriores. Puede ser una imprimación a base de zinc u otro tipo de anticorrosivo.
- 3) *Capa epóxica:* Después de la imprimación anticorrosiva, se aplica una capa de pintura epóxica. Las pinturas epóxicas son conocidas por su resistencia química y durabilidad. Proporcionan una excelente protección contra la corrosión y son adecuadas para aplicaciones en ambientes agresivos. Esta capa se aplica sobre la imprimación.
- 4) *Capa de terminación:* Finalmente, se aplica una capa de terminación, que es la capa final de pintura. Esta capa puede ser una pintura a base de

poliuretano, poliéster o cualquier otro tipo de pintura adecuada para la aplicación específica. La capa de terminación proporciona protección adicional y puede mejorar la estética de la superficie.

Aunque este esquema ofrece una protección excepcional y duradera contra la corrosión en sustratos de acero (siendo especialmente efectivo en entornos corrosivos o marinos), su gran desventaja radica en los costos significativos, extensos plazos de trabajo, maquinaria y equipo especializado, y finalmente, una importante gestión de residuos producto del proceso de granallado.

7. Especificaciones técnicas de los equipos de cubierta

Diámetro [m]	7,3
Número de aspas	6
Motor y transmisión	Motor con imanes de neodimio.
Tipo de seguridad	IP66
Confección	Sin soldaduras expuestas, pintura de terminación para protección química.
Temperaturas de operación [°C]	-30°C < T°C < 50°C
Longitud tubo de extensión [m]	1,5
Correcciones de seguridad	2 cables de acero de seguridad + 4 tensores individuales.
Aspas	Aluminio laminado con terminales en color amarillo de seguridad.
Peso [kg]	134
Seguridad en aspas	Linga de seguridad interior.
Velocidad máxima [RPM]	64
Detalle eléctrico	Monofásico, 220V 15A.
Consola de mando	Conexión en simultáneo cada 6 equipos.
Origen	Americano
Marca sugerida	BigAssFans - BETABAF.

Tabla 13. Especificaciones técnicas equipo de cubierta.

Fuente: BETABAF.

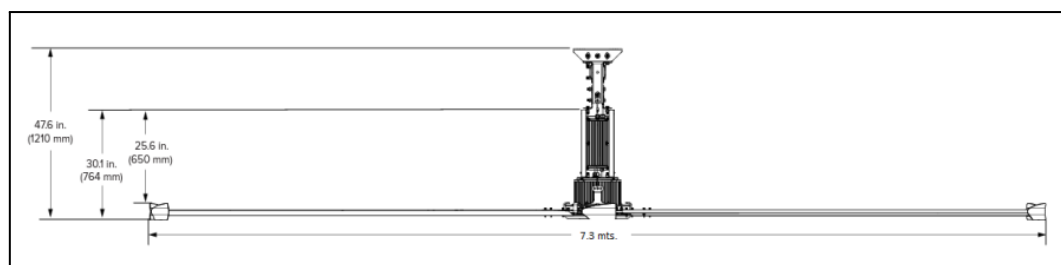


Figura 14. Diagrama de los equipos de cubierta junto a sus dimensiones.

8. Especificaciones técnicas de los ventiladores direccionales

Diámetro [mm]	876
Número de aspas	3
Motor y transmisión	Motor de 0,5 HP - transmisión directa con imanes.
Tipo de seguridad	IP66, ambientes exteriores.
Confección	Sin soldaduras expuestas, pintura de terminación para protección química.
Temperaturas de operación [°C]	-30°C < T°C < 50°C
Consumo de energía	20/600W
Correcciones de seguridad	Equipo aislado con una protección neumática plástica.
Aspas	Tridimensionales con inclinación progresiva.
Peso [kg]	48
Velocidad máxima [RPM]	1308
Detalle eléctrico	Monofásico, 220-240 VCA, 50/60 Hz, 15A
Consola de mando	Encendido y apagado con velocidad variable.
Origen	Americano
Marca sugerida	BigAssFans - BETABAF.

Tabla 14. Especificaciones técnicas de los ventiladores direccionales.

Fuente: BETABAF.

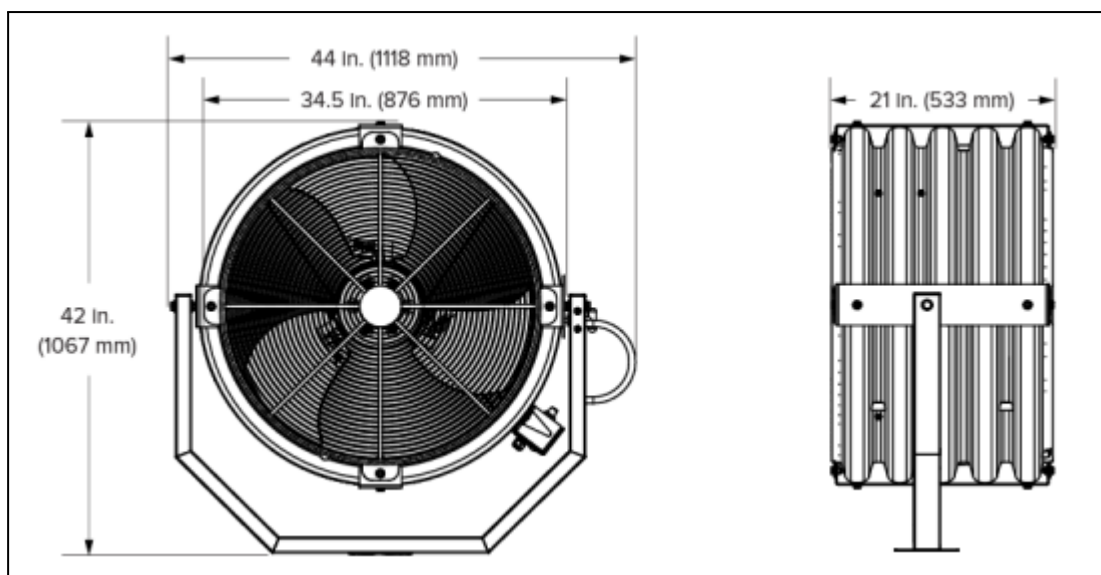


Figura 15. Diagrama de los equipos direccionales junto a sus dimensiones.

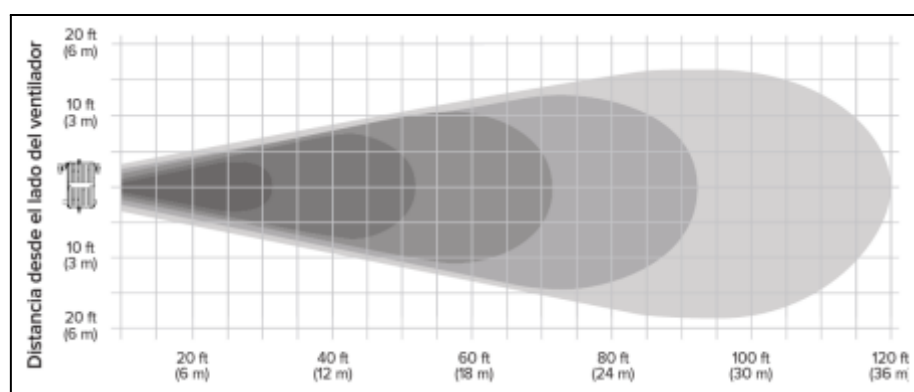


Figura 16. Alcance lineal de los ventiladores direccionales.

9. Metodología Cascada

También conocida como ciclo de vida de desarrollo de sistemas (SDLC, por sus siglas en inglés), es un proceso lineal en el que el trabajo se realiza de manera escalonada (similar a una cascada) y en orden secuencial. En este enfoque, todas las tareas están vinculadas por una dependencia. Esto significa que debemos finalizar cada tarea antes de poder comenzar con la siguiente. Esto no solo garantiza que el trabajo se mantenga encaminado, sino que también promueve una comunicación clara durante todo el proceso. Aunque algunas organizaciones modernas lo consideran un enfoque más tradicional, este método es excelente para crear un plan de proyecto sólido y bien detallado. Dado que la metodología de gestión de proyectos en cascada es muy detallada, es ideal para trabajar en proyectos grandes que tienen muchas partes involucradas.