UNIVERSIDAD DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLOGICA

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIAS DE LA ENERGIA

ANÁLISIS DE PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN, A SISTEMA DE VENTILACIÓN DE PROPULSIÓN EN PALAS ELÉCTRICAS P&H, PARA REDUCIR DETENCIONES Y COSTOS POR PRECIPITACIONES ADVERSAS

Proyecto de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Ingeniero de Ejecución en Electricidad

Profesor Guía: Juan Astorga Gómez

Claudio Rodrigo Cañete Rojas

Copiapó, Chile 2025

AGRADECIMIENTOS

De manera sincera y genuina agradezco a toda mi red de apoyo, que me motivó a seguir con este proceso, aun cuando estuvo por diversas razones, muy lejano a materializarse.

Agradezco a Dios y al señor Jesucristo, por darme la capacidad de perseverar, seguir adelante con mi desarrollo académico, a pesar de todos los obstáculos que se presentaron en mi camino.

A mis padres, por recordarme siempre que soy capaz de superar cualquier obstáculo y lograr toda meta, por su orientación y perseverancia en desear que un día su hijo además de ser una buena persona, se convierta en un profesional legítimo.

A mi esposa, hija e hijo, por ser mi principal fuente de motivación y motor para seguir desarrollándome día a día en el área profesional y sobre todo como padre de familia. Por colmarme de amor, fe y esperanza. Por darme soporte y respaldo en todo momento y cada vez que lo necesité.

Sin ustedes, este proceso hubiera sido arduo y muy difícil. Por eso y todo lo que me han brindado, les agradezco hoy y siempre.

INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....vii
ABSTRACT..... viii
CAPITULO I.....1
INTRODUCCIÓN 1
1.1 Objetivo general.....2
1.2 Objetivos específicos 2
1.3 Metodología de trabajo 3
1.3.1 Conceptos teóricos de los sistemas de ventilación.....5
1.3.2 Clasificación de los sistemas de ventilación. 5
1.3.3 Sistema de ventilación forzada.....6
1.3.4 Conceptos teóricos de un sistema deshumidificador de aire.....7
1.3.5 Clasificación de los sistemas deshumidificadores. 7
1.3.6 Sistema de deshumidificación por agentes disecantes. 8
CAPITULO II 11
GENERALIDADES DE UNA PALA ELÉCTRICA MINERA P&H Y SU SISTEMA DE VENTILACIÓN DE PROPULSIÓN.....11
2.1 Partes de una pala P&H.....11
2.2 Descripción del funcionamiento de una pala P&H 16
2.3 Descripción del sistema de ventilación original, asociado a los motores de propulsión en una pala P&H 19
CAPITULO III.....22
PROBLEMÁTICA Y MOTIVACIÓN DE LA PROPUESTA 22
3.1 Problemática.....22
3.2 Acciones preventivas de la minera frente a condiciones climáticas adversas 23
3.3 Registro meteorológico del año 2024 25
CAPITULO IV.....27
ARGUMENTO DE LA PROPUESTA.....27
4.1 Gestión de Activos.....27
4.2 Normas ISO 55.000.....28

4.3 Alineamiento de la propuesta con las Normas 55.001 y 55.002 29
4.4 Alineamiento de la Propuesta con la Confiabilidad 30
CAPITULO V 36
DESCRIPCIÓN DEL NUEVO SISTEMA DE VENTILACIÓN AUTOMATIZADO .. 36
5.1 Componentes del sistema de automatización 36
5.2 Descripción del funcionamiento del sistema de ventilación, con la automatización propuesta implementada 39
5.2.1 Ventilación en jornadas sin precipitaciones 40
5.2.2 Ventilación en jornadas con precipitaciones 41
CAPITULO VI 45
EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN ... 45
6.1 Método Monte Carlo 45
6.2 Preparación de datos históricos 46
6.3 Cálculo de la media de días lluviosos históricos 47
6.4 Modelado de la incertidumbre 53
6.5 Simulación de Escenarios 56
6.5.1 Escenario 1 (original) 56
6.5.2 Escenario 2 (simulación 1) 57
6.5.3 Escenario 3 (simulación 2) 58
6.6 Ahorros potenciales 62
CONCLUSIONES 64
BIBLIOGRAFÍA 66

INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura N°1.1: Diagrama conceptual del desarrollo de la propuesta 4
Figura N°2.1: Partes de una pala eléctrica minera P&H 11
Figura N°2.2: Tornamesa de una pala P&H 12
Figura N°2.3: Interior de la sala de máquinas 13
Figura N°2.4: Cabina y consola del operador 13
Figura N°2.5: Accesorios principales 14
Figura N°2.6: conjunto completo del chasis inferior de la pala 15
Figura N°2.7: plataforma superior de la pala 17
Figura N°2.8: conjunto completo del chasis inferior de la pala 17
Figura N°2.9: Pala P&H 4100XPC en proceso de carguío 19
Figura N°2.10: Ventiladores del sistema de propulsión 20
Figura N°2.11: Gabinete de control inferior 21
Figura N°3.1: Representación gráfica de un plan de alertas de una minera 23
Figura N°3.2: Índice de precipitaciones del año 2024, registradas por estación climatológica pública ubicada en la Región de Coquimbo 26
Figura N°4.1: Relación del sistema de gestión de activos con la gestión de activos 27
Figura N°4.2: Distribución de Weibull, de la vida útil de los motores de propulsión 34
Figura N°5.1: Deshumidificador marca Trotec 38
Figura N°5.2: Tablero de control de la automatización propuesta 39
Figura N°5.3: Diagrama del sistema de ventilación original 43
Figura N°5.4: Diagrama del sistema de ventilación con deshumidificación 44
Figura N°6.1: Histograma de distribución, escenario 3 60

INDICE DE TABLAS

Tabla N°6.1: Definición de los tipos de lluvia por intensidad 47

Tabla N°6.2: Muestra de datos, obtenidos de la estación meteorológica 48

Tabla N°6.3: Columnas adicionales con categorización de precipitaciones, por nivel de intensidad 49

Tabla N°6.4: Conteo anual de lluvia, según su intensidad 50

Tabla N°6.5: Sumatoria de días lluviosos, según su intensidad 51

Tabla N°6.6: Desviación estándar de días lluviosos históricos, según su intensidad 54

Tabla N°6.7: Regla matemática de la desviación estándar con distribución normal, para días lluviosos con precipitaciones ≥ 3 mm 55

Tabla N°6.8: Muestra de escenarios simulados 59

Tabla N°6.9: Resumen de escenarios simulados 60

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo, fue analizar si la propuesta de automatizar el sistema de ventilación original de propulsión en palas eléctricas P&H, fue o no capaz de reducir costos, por detenciones preventivas a criterio humano, cuando existen precipitaciones adversas.

Se describieron ambos sistemas de ventilación utilizados, para poder entender las diferencias entre el original y el nuevo sistema automatizado.

Se comentó la problemática y la necesidad del por qué proponer esta automatización. El argumento se basó en la gestión de activo asociada a la Norma ISO 55.001 y 55.002. Esto, fue fortalecido con base en la ingeniería de confiabilidad, explicando más allá de lo administrativo, lo importante que es preservar la vida útil de un activo, a través de un sólido modelo matemático, denominado curva Weibull.

En la etapa final, se realizó la simulación de escenarios con el modelo estadístico Monte Carlo, basado en datos históricos con registros de precipitaciones. Como resultado, la evaluación demostró que la implementación de un sistema deshumidificador en la ventilación original de propulsión de la pala, mejoró considerablemente la disponibilidad de este equipo, al reducir las detenciones preventivas por criterio humano, durante jornadas con precipitaciones. De esta manera, redujo también los costos asociados a estos eventos y la intervención humana, debido a su versatilidad y continuo monitoreo para realizar de forma automática las transiciones en días soleados o lluviosos.

AUTOMATIZACIÓN – VENTILACIÓN – PALA ELÉCTRICA MINERA P&H

ABSTRACT

The main objective of this work was to analyze whether the proposal to automate the original propulsion ventilation system in P&H electric shovels was able to reduce costs associated with preventive shutdowns decided on the basis of human judgment during adverse precipitation conditions.

Both ventilation systems used were described, in order to understand the differences between the original and the new automated system.

The existing problem and the need for this automation were discussed. The rationale was based on asset management according to ISO 55.001 and 55.002 standards. This approach was further reinforced from a reliability engineering perspective, going beyond the administrative aspect and emphasizing the importance of preserving asset life through a robust mathematical model known as the Weibull curve.

In the final stage, scenario simulations were performed using the Monte Carlo statistical model, based on historical precipitation records. The results showed that implementing a dehumidifier system in the shovel's original propulsion ventilation significantly improved equipment availability by reducing human-initiated preventive shutdowns during rainy work shifts. Consequently, the costs associated with these events and human intervention were also reduced, thanks to the system's versatility and continuous monitoring, which enables automatic transitions on both sunny and rainy days.

AUTOMATION – VENTILATION – P&H MINING ELECTRIC SHOVEL

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, en la minería chilena, donde la eficiencia y disponibilidad de los equipos son factores críticos para la productividad y rentabilidad, las palas eléctricas P&H son equipos clave en la extracción de mineral. Sin embargo, estos equipos a menudo tienen problemas por el clima extremo, ya sea lluvia o nieve. El sistema de ventilación original de los motores de propulsión no tiene medios automatizados para controlar el ingreso de humedad en días lluviosos, forzando a cada faena minera a detener estos equipos de manera preventiva para evitar daños por infiltración de agua, lo que podría incluso generar fallos catastróficos si no se detuviera a tiempo. Estas interrupciones no solo afectan la continuidad de la operación, sino que también aumentan los costos relacionados con detenciones preventivas no programadas y el desgaste prematuro de los motores, afectando la gestión de activos de la empresa.

Esta investigación suma un valor educativo al campo tecnológico y al mismo tiempo contribuye en la gestión de activos de los procesos industriales, al presentar una automatización simple y de moderado costo, la cual podría ser implementada en otra pala P&H modelo 4100XPC si es necesario, e incluso en otras maquinarias mineras de similares características, expuestas a ambientes húmedos. La importancia de este estudio se basa en mejorar la gestión de activos en cumplimiento con las normas internacionales ISO 55001 y 55002, las cuales fomentan estrategias proactivas para maximizar el valor de los equipos durante su ciclo de vida. Hoy en día, la industria minera se enfrenta a un escenario cada vez más interrumpido por fenómenos climáticos, y requiere de soluciones innovadoras y de costo moderado. La presente investigación, es propositiva y analítica de una automatización conceptual que no se materializará, pero que se verificará mediante herramientas de modelado y simulación para probar su factibilidad teórica.

1.1 Objetivo general

Analizar a través de una propuesta teórica si la incorporación de un deshumidificador al sistema de ventilación original de propulsión en las palas eléctricas P&H, puede o no reducir costos por detenciones preventivas, provocadas durante precipitaciones adversas.

1.2 Objetivos específicos

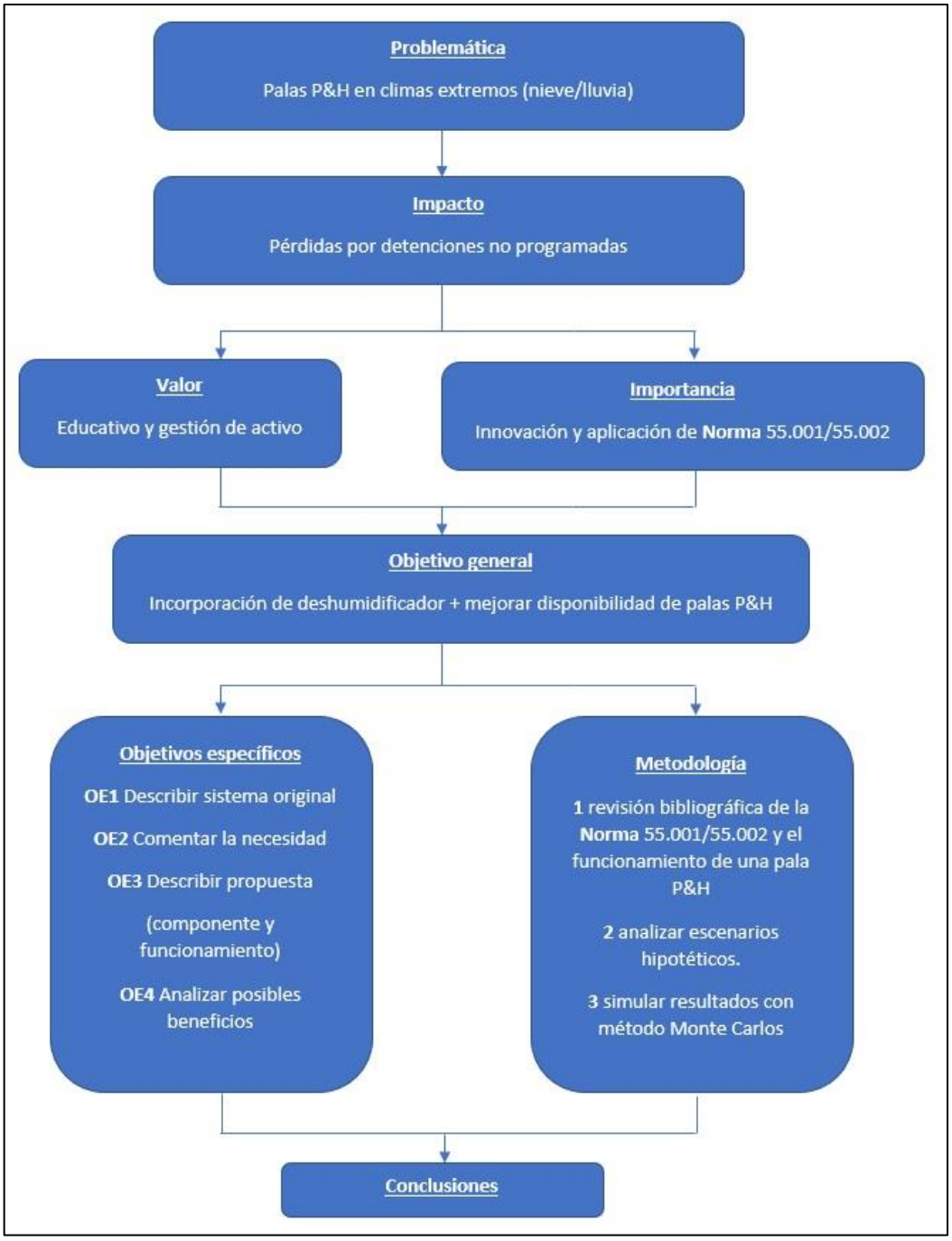
- Describir el sistema de ventilación original asociado a los motores de propulsión en las palas eléctricas P&H, su funcionamiento y componentes.
- Comentar la necesidad que motiva la propuesta de la automatización al sistema de ventilación original en las palas eléctricas P&H, basado en la gestión de activos e innovación en materia tecnológica.
- Describir conceptualmente la propuesta de automatización del sistema de ventilación. Su funcionamiento, componentes y su adaptación al sistema de ventilación original.
- Evaluar el impacto de la automatización propuesta al sistema de ventilación, mediante escenarios simulados, con el método estadístico Monte Carlo.

1.3 Metodología de trabajo

La metodología para automatizar el sistema de ventilación original de una pala P&H, asociado a los motores de propulsión, con un equipo deshumidificador, que tenga las características necesarias para trabajar en un ambiente con condiciones meteorológicas hostiles, debe considerar varios factores importantes para tener un rendimiento adecuado en el entorno de trabajo. Estos factores incluyen la seguridad, las condiciones ambientales (lluvia y/o nieve), y los riesgos asociados con el trabajo en un entorno potencialmente peligroso. A continuación, se detalla una metodología general para llevar a cabo la automatización del sistema de ventilación de propulsión en una pala P&H.

1. Revisión bibliográfica, sobre la manera en que opera una pala P&H y su sistema original de ventilación de propulsión.
2. Revisión de las normas ISO 55001 y 55002, en conjunto con el modelo estadístico Weibull, para justificar la propuesta.
3. Descripción del sistema propuesto para automatizar la ventilación de los motores de propulsión.
4. Analizan distintos escenarios hipotéticos, que ayuden a comparar distintas situaciones operativas del equipo, por ejemplo: cantidad de jornadas de trabajo con precipitaciones, tiempos de detenciones preventivas para evitar daños por ingreso de agua, sistema automatizado con resultados óptimos o regulares, y costos por detenciones.
5. Simular a través del método Monte Carlo, la incertidumbre en los escenarios hipotéticos, creando distribuciones probabilísticas de la disponibilidad del equipo frente a diferentes condiciones meteorológicas.
6. Evaluar en base a lo anterior, los ahorros económicos para cuantificar los beneficios de la propuesta.

Figura N°1.1: Diagrama conceptual del desarrollo de la propuesta



Fuente: archivo personal

1.3.1 Conceptos teóricos de los sistemas de ventilación.

Un sistema de ventilación renueva el aire de un espacio delimitado, para mantener condiciones ambientales saludables, confortables y seguras. Mientras que la ventilación en espacios habitables por personas se orienta al confort e higiene, la ventilación industrial es una necesidad para controlar contaminantes aéreos, humedad, toxicidad, y disipar el calor de procesos productivos. Esto es importante para prevenir el sobrecalentamiento de piezas esenciales y mantener la seguridad y eficiencia en el trabajo.

1.3.2 Clasificación de los sistemas de ventilación.

Los sistemas de ventilación se pueden llevar a cabo por medios naturales o por equipos mecánicos dependiendo de la necesidad y la naturaleza del habitáculo a ventilar. A pesar de haber clasificaciones con diferentes nombres e indicaciones, todas radican en los mismos principios de funcionamiento:

- Natural. Se aprovecha el flujo de aire natural para ventilar instalaciones residenciales y/o comerciales, implementando puertas, ventanas, chimeneas, fisuras, etc.
- Forzada. Se emplea en espacios con alta contaminación, humedad, o temperatura, donde la implementación de un sistema de ventilación natural no es suficiente.
- Localizada. Se emplea en procesos donde hay generación puntual de contaminantes como humos, vapores y polvos; como extractores en cocinas industriales.

1.3.3 Sistema de ventilación forzada.

Un sistema de ventilación forzada dependiendo de las necesidades puede ser con presión positiva o negativa. La ventilación forzada con presión negativa o exhaustiva retira aire del interior de un espacio y crea una presión interior menor que la exterior. Es eficaz para remover contaminantes internos de un habitáculo, al extraer el aire contaminado directamente en la fuente, logrando el control de humos, vapores y partículas. Una desventaja común de los sistemas de presión negativa es su considerable consumo energético, ya que generalmente deben estar en funcionamiento constantemente. Otro inconveniente se presenta cuando el espacio o habitáculo no está del todo sellado, pudiendo ingresar por posibles aberturas aire con contaminantes o con propiedades no deseadas, provocando el deterioro de la calidad ambiental interna. Además, su eficacia se ve negativamente afectada en espacios demasiado amplios y/o altos.

Por consiguiente, un sistema de ventilación con presión positiva succiona y empuja aire hacia el interior de un espacio, generando una presión interna mayor que la exterior. El aire sale por aberturas diseñadas y controladas, reduciendo la infiltración de aire contaminado, perfecto para ambientes sensibles o con necesidad de protección de procesos o componentes críticos. Al igual que un sistema de presión negativa, representa un considerable consumo energético. Sin embargo, la desventaja más significativa es que si no contempla un sistema de filtrado por la zona de succión, puede ingresar agentes externos contaminantes, incluyendo agua en climas con precipitaciones. Además, si el habitáculo no está sellado por completo, se producen fugas que se traducen en pérdidas de presión, provocando que la presurización generada por el sistema de ventilación pierda eficiencia.

1.3.4 Conceptos teóricos de un sistema deshumidificador de aire.

La deshumidificación de aire es un proceso o sistema que reduce la humedad relativa del aire en un espacio o zona cerrada. Sus principales usos son prevenir la proliferación de microorganismos que generan malos olores en casas, oficinas, bodegas, museos y laboratorios. Mejora la calidad del aire en instalaciones comerciales y/o residenciales, creando un ambiente más confortable para las personas. Se usa en procesos de secado para proteger productos almacenados como en la industria farmacéutica, alimentaria, textil entre otra y también para proteger activos de una empresa como máquinas, equipos eléctricos y electrónicos, recursos y materiales sensibles a la humedad.

1.3.5 Clasificación de los sistemas deshumidificadores.

- Por enfriamiento. Se utilizan sistemas de aire acondicionado convencionales, donde el aire pasa por un evaporador que, al ser una superficie fría, evapora el agua y luego la condensa, separándola del aire. Es el método más utilizado en instalaciones comerciales y residenciales.
- Por compresión. El aire se comprime, reduciendo su capacidad de almacenar humedad y generando un alto nivel de condensación, pudiendo generar la saturación con agua del propio equipo compresor. Es costoso para procesos residenciales o comerciales, pero al ser complementado con sistemas que puedan eliminar la condensación generada, son equipos sumamente beneficiosos para procesos industriales.
- Por disecantes. El aire es forzado a pasar en dirección y a través de cámaras que contienen materiales disecantes, que separan la humedad del aire en forma de vapor.

1.3.6 Sistema de deshumidificación por agentes disecantes.

Las sales o materiales disecantes son agentes químicos que pueden separar la humedad del aire en forma de vapor. Pueden ser clasificadas como adsorbentes cuando adsorben la humedad sin sufrir cambios en su composición física o química, y absorbentes cuando absorben la humedad del aire y si se ven afectados en su composición integral. Pueden ser sólidos o líquidos.

Los agentes desecantes pueden ser utilizados una y otra vez sin sufrir cambios. Para esto, se somete a un proceso donde se quita la humedad adquirida, denominado regeneración. Este proceso se logra calentando el disecante para aumentar su presión de vapor de agua con una presión más baja.

A diferencia de la deshumidificación asociados a sistemas de aire acondicionado, donde se enfría el aire para condensar la humedad inherente en él, los deshumidificadores con agentes disecantes capturan la humedad del aire tras forzarlo a pasar por una zona con baja presión de vapor, qué al entrar en contacto con una presión más alta ejercida por la humedad contenida en el aire de entrada, provoca que las moléculas de agua se adhieran al material disecante, separándolo del aire.

En síntesis, los deshumidificadores disecantes separan la humedad del aire al someterlo a cambios de presión de manera continua y repetitiva, en un ciclo de tres etapas.

- Primera etapa. La humedad del aire ingresa al proceso y es capturada por el agente disecante, el cual comienza a aumentar su temperatura en forma directamente proporcional a la cantidad de agua que captura, hasta alcanzar un nivel en donde la presión de su vapor es igual a la presión de vapor del aire que se desea secar. En ese momento el agente disecante ya no es capaz de capturar más humedad.
- Segunda etapa. El agente disecante saturado de humedad es calentado para aumentar la presión de vapor de la humedad contenida en él, logrando separarse del agua. Este proceso se llama desorción y permite obtener nuevamente un agente disecante seco, pero con alta temperatura.
- Tercera etapa. El agente disecante es sometido a un proceso de enfriamiento, para que pueda recuperar su baja presión, y reiniciar el ciclo nuevamente.

En el caso de los agentes líquidos, se emplean soluciones líquidas higroscópicas como soluciones salinas de cloruro de litio o bromuro de litio, que absorben la humedad del aire cuando este entra en contacto con la solución. En comparación con algunos disecantes sólidos, los líquidos pueden regenerarse con temperaturas más bajas, oponen una menor resistencia al flujo de aire a tratar ofreciendo una mayor eficiencia y, además, pueden eliminar microorganismos y contaminantes del aire. Sin embargo, hay agentes disecantes líquidos que son corrosivos y pueden causar daños en el equipo, y peor aún esta solución puede ser arrastrada junto a la corriente de aire a tratar, provocando problemas en la ambientalización de las instalaciones. Por otra parte, estos agentes también son propensos a la cristalización, lo que obliga a tener que realizar chequeos continuos de los equipos y cambiar la solución de manera periódica. Habitualmente, se utilizan para tratar el aire en grandes instalaciones industriales, sistemas centralizados de tratamiento de aire y aplicaciones donde se requiere una deshumidificación continua y de gran volumen.

El proceso que contempla materiales sólidos higroscópicos, como gel de sílice, zeolitas o cloruro de litio en forma sólida, adsorbe la humedad del aire forzándolo a pasar a través del disecante. Estos se pueden reutilizar numerosas veces al pasar por el proceso de regeneración. No obstante, este último proceso es imperioso e indispensable, de lo contrario, los disecantes se saturarían de agua limitando por completo su capacidad de adsorción. Habitualmente se emplea en cámaras de almacenamiento, museos, laboratorios y procesos industriales donde se requiere un control estricto de la humedad, especialmente a bajas temperaturas.

Este ciclo lo realiza un equipo deshumidificador disecante sólido rotatorio, que es uno de los más utilizados en procesos industriales. Tiene un disco rotatorio y en su superficie mantiene los agentes disecantes en pequeños canales en una disposición similar a la de un panal de abeja, construidos con láminas corrugadas de aluminio, fibra de vidrio o papel, las cuales están impregnadas de disecantes. El disco gira lenta y contantemente mientras se generan dos corrientes de aire opuestas. Una lámina fija instalada en el disco giratorio, separa ambos flujos de aire opuesto. Una corriente se encarga de que el aire húmedo que se desea secar pase por los canales que contienen los disecantes, adsorbiendo la humedad y por consiguiente tendiendo a su saturación. La otra corriente de aire caliente y seco en dirección opuesta en el disco, es para realizar el proceso de regeneración. De esta manera el área del disco que se vea saturada seguirá girando hasta llegar a la zona de regeneración y posteriormente a la de adsorción una y otra vez. A pesar de ser un sistema ligero es resistente, duradero y asegura una gran superficie de contacto con el aire a secar, permitiendo tratar grandes cantidades de flujo.

CAPITULO II

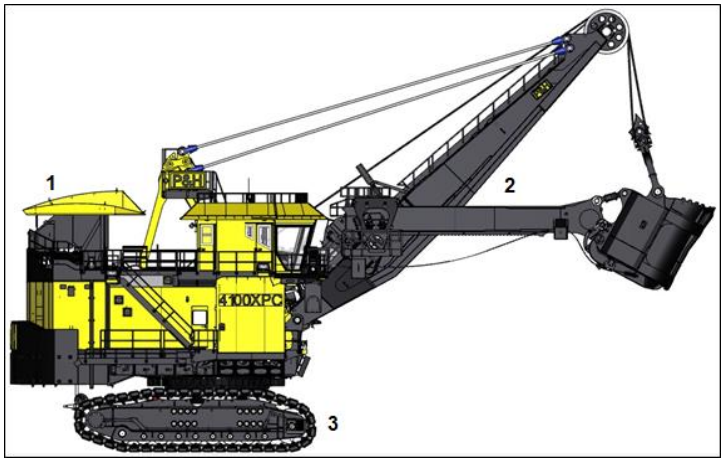
GENERALIDADES DE UNA PALA ELÉCTRICA MINERA P&H Y SU SISTEMA DE VENTILACIÓN DE PROPULSIÓN

2.1 Partes de una pala P&H

Las palas eléctricas P&H son equipos muy complejos, amplios y de gran tamaño. Una manera de poder entender su funcionamiento es seccionando este equipo en tres partes principales.

- Parte superior (1)
- Accesorios (2)
- Parte inferior (3)

Figura N°2.1: Partes de una pala eléctrica minera P&H

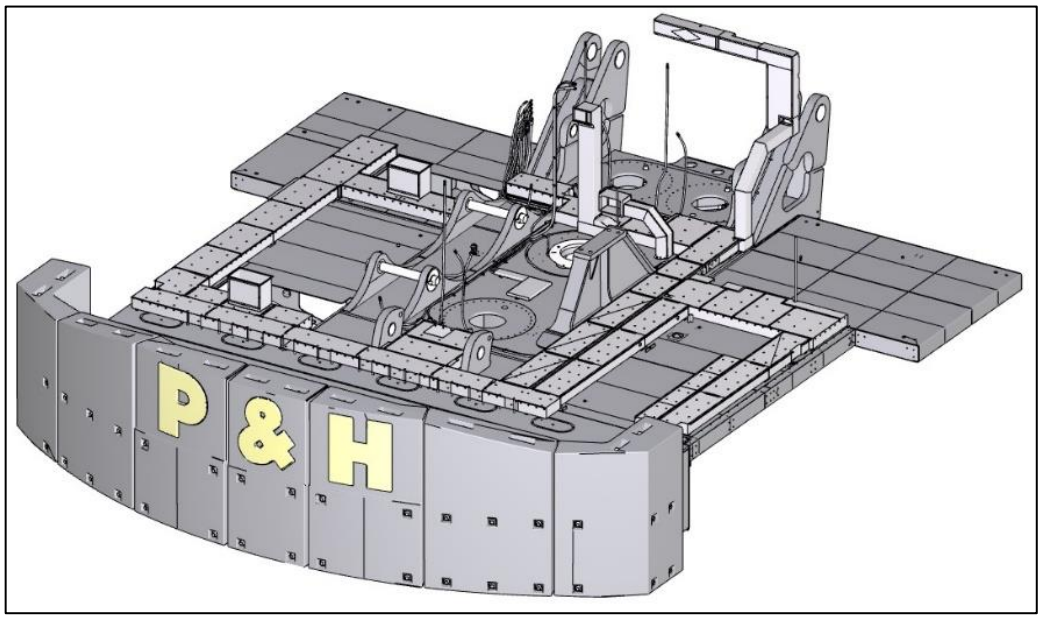


Fuente: Repositorio Komatsu Mining Corp

La parte superior, puede subdividirse en las siguientes secciones:

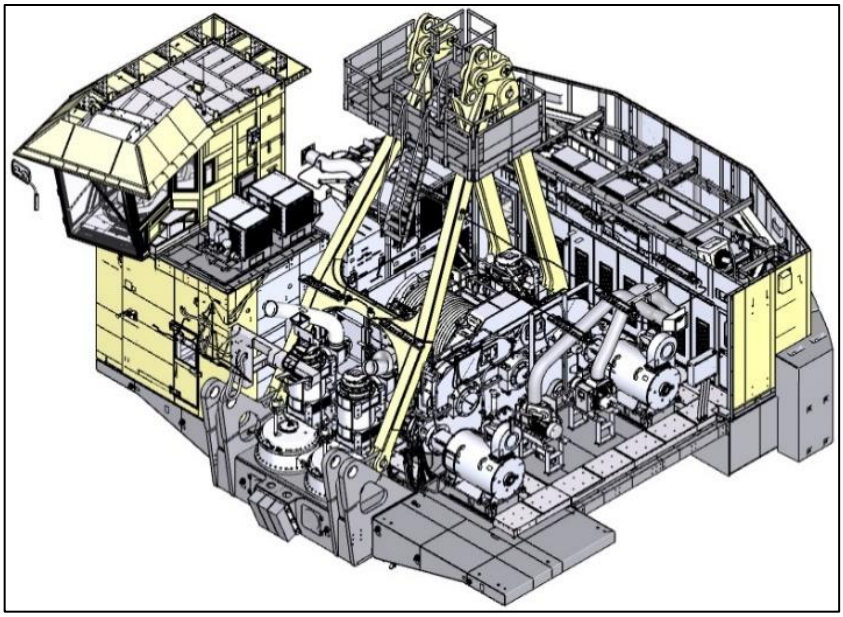
- Tornamesa: Es la plataforma principal de la parte superior de una pala y gira en 360° en una u otra dirección. Refiérase a la Figura N°2.2.
- Sala de máquinas: Es el habitáculo que se forma al cerrar con paneles la plataforma principal, y dentro de ella se encuentran gran cantidad de componentes vitales para el funcionamiento del equipo. Refiérase a la Figura N°2.3.
- Cabina de operador: Está ubicada sobre la sala de máquinas a un costado derecho del equipo. Aquí se sitúa el centro de control de carga, compuesto por la consola de controles, indicadores y medidores de operación. Refiérase a la Figura N°2.4.

Figura N°2.2: Tornamesa de una pala P&H



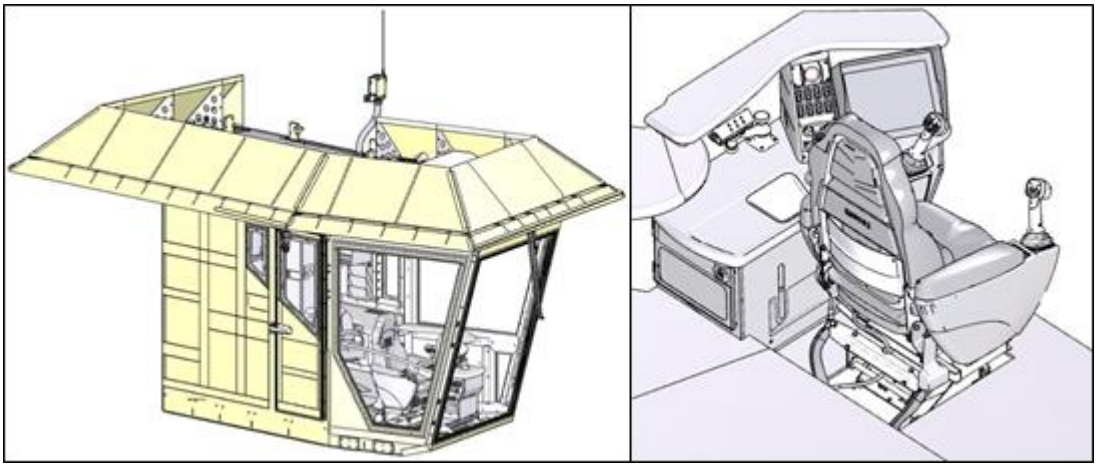
Fuente: Repositorio Komatsu Mining Corp

Figura N°2.3: Interior de la sala de máquinas



Fuente: Repositorio Komatsu Mining Corp

Figura N°2.4: Cabina y consola del operador

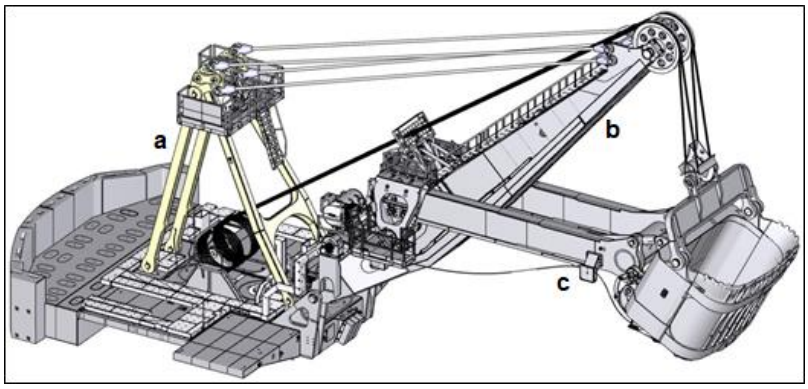


Fuente: Repositorio Komatsu Mining Corp

Accesorios. Dentro de una pala P&H hay numerosos sistemas principales y auxiliares, y todos cumplen un rol importante para el funcionamiento de estos equipos. Sin embargo, sólo se estudiarán los sistemas más relevantes. Los tres accesorios más importantes dentro de una pala son:

- Gantry (a): Es una estructura elevada con forma de marco que está asentada en la tornamesa, sus cuatro puntos base están dentro de la sala de máquinas, pero la parte superior sobresale de ésta. Su función es sostener la estructura completa de la pluma a través de cuatro cables de suspensión, los cuales están conectados en la parte superior de Gantry por un extremo, y en el otro están conectados en la parte superior de la pluma.
- Pluma (b): Es la estructura que contiene los mecanismos para mover el mango hacia adelante o atrás, y es la encargada de sostener con un juego de poleas ubicadas en su extremo superior, el balde que pende de cables.
- Mango y balde (c): El mango consta de dos ejes rectos que trasmiten el movimiento de un motor hacia el balde, para que pueda avanzar o retroceder. El balde es el cubo o cucharón con el que se extrae el material del talud.

Figura N°2.5: Accesorios principales

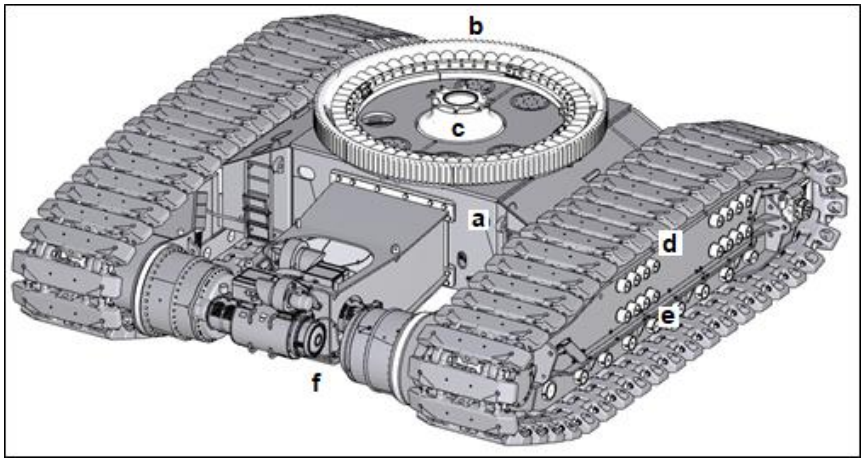


Fuente: Repositorio Komatsu Mining Corp

La parte inferior, puede subdividirse en las siguientes secciones:

- Chasis inferior (Carbody) (a): Es el soporte o estructura principal que ayuda a conectar los diversos sistemas de la parte inferior y también es donde descansa la parte superior giratoria.
- Corona de giro (b): Permite que la parte superior pueda girar de manera independiente respecto al chasis inferior.
- Pin central (c): Es el punto central y eje del equipo, que brinda la unión entre la parte superior e inferior.
- Bastidores laterales de orugas (d): Es el cuerpo que sostiene el paño completo de zapatas que forman la oruga.
- Tren de polines (e): Son los componentes como: polines, rueda tensora y rueda motriz, que permiten que el paño de oruga pueda desplazarse en una dirección a otra.
- Mecanismo de propulsión (f): Los motores de propulsión generan el movimiento de las orugas a través de trasmisiones planetarias.

Figura N°2.6: conjunto completo del chasis inferior de la pala



Fuente: Repositorio Komatsu Mining Corp

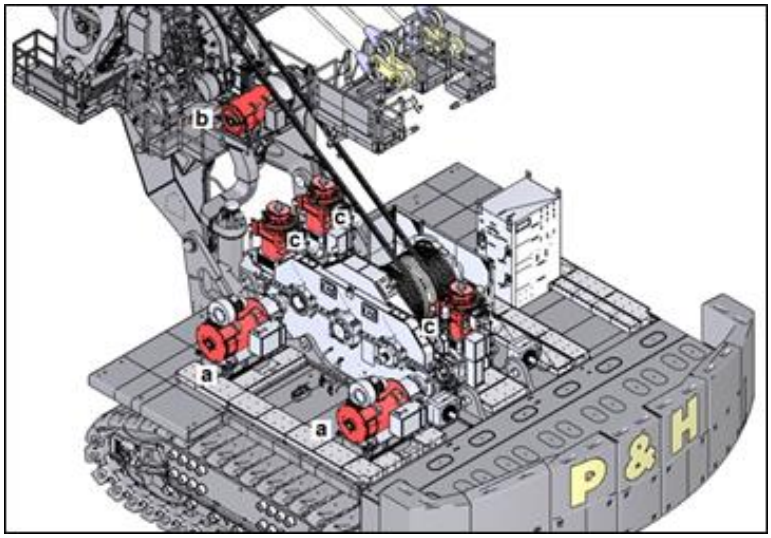
2.2 Descripción del funcionamiento de una pala P&H

Para poder entender el funcionamiento de una pala P&H o comprender de qué manera se utiliza en la industria minera, se debe conocer cuáles son sus principales sistemas que generan los movimientos del equipo:

- Sistema de levante: Dos motores [a] ubicados al interior de la sala de máquinas producen el movimiento para poder girar el tambor de levante a través de una trasmisión mecánica. Dos cables de levante están conectados en un extremo al tambor y el otro extremo conecta con el balde. Así, el cable de levante se enrolla o desenrolla alrededor del tambor, provocando que el balde de la pala suba o baje respectivamente. Refiérase a la Figura N°2.8.
- Sistema de empuje: Un motor [b] situado en la parte baja de la pluma, produce el movimiento para poder desplazar ambos ejes rectos del mango, en dirección de avance hacia el talud o en retroceso. El motor tiene una correa que trasmite el movimiento a una trasmisión que, a su vez, hace girar un eje que produce el desplazamiento del mango. Refiérase a la Figura N°2.7.
- Sistema de giro: Dentro de la sala de máquina hay tres motores [c], que producen el movimiento para que la parte superior de la pala, es decir, la tornamesa pueda girar 360° en una u otra dirección. Cada motor tiene su trasmisión independiente, terminando en un piñón que engrana con la corona de giro ubicada en la parte inferior del equipo. De esta manera al girar los motores y mantenerse estático el chasis inferior, gira la tornamesa. Refiérase a la Figura N°2.7.
- Sistema de propulsión: En el chasis inferior se ubican dos motores [d] con trasmisiones independiente, conectadas a una ruda motriz en cada bastidor con orugas, permitiendo mover cada oruga en dirección opuesta y con distinta velocidad si es necesario, de esta manera el operador puede trasladar la pala de un punto a otro. Refiérase a la Figura N°2.8.

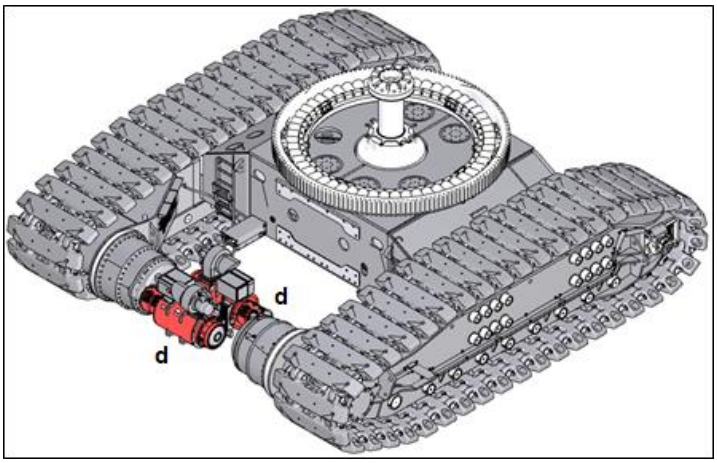
Cada uno de estos motores principales, tiene implementado un ventilador centrifugo para enfriar su interior. Todos están ubicados al interior de la sala de máquinas, excepto los ventiladores asociados al sistema de propulsión, que están ubicados en la intemperie.

Figura N°2.7: plataforma superior de la pala



Fuente: Repositorio Komatsu Mining Corp

Figura N°2.8: conjunto completo del chasis inferior de la pala



Fuente: Repositorio Komatsu Mining Corp

Una pala P&H tiene dos modos de trabajo, “modo excavación” y “modo traslación”. De esta manera los joysticks de la consola pueden ser utilizados en un modo u otro, nunca ambos, ahorrando espacio y controles redundantes. Cuando el operador comienza su jornada y da marcha al equipo, por configuración este siempre arrancará en modo excavación, lo que significa que ambos joysticks al ser manipulados generarán movimientos asociados al “modo excavación”, es decir, estará activo el sistema de levante, empuje y giro. Por otra parte, cuando el operador a través de un botón cambie al “modo traslación”, se inhibirá el sistema de levante y empuje, entonces ahora estará activo el sistema de propulsión y giro. El sistema de giro siempre estará habilitado en ambos modos de trabajo.

Un ciclo de trabajo de una pala P&H consta de cuatro fases y se refiere al movimiento repetitivo que realiza el equipo durante el proceso de carguío.

- Fase de excavación: Involucra empujar el balde hacia el talud y de forma simultánea subir el balde para recoger el material.
- Fase de giro: Con el mango del balde en posición horizontal, el operador comienza a girar la tornamesa hacia uno de sus costados hasta llegar a una postura planificada, donde se posicionará un camión de extracción de alto tonelaje vacío debajo del balde lleno.
- Fase de vaciado: Con el balde sobre el camión, el operador abre desde la consola la tapa del balde descargando el material dentro de la tolva, controlando la altura del balde y evitando daños al operador y/o camión.
- Fase de retorno: Una vez vaciado el balde, el operador con un giro en dirección opuesta al anterior retorna en al talud quedando en posición para comenzar otro ciclo nuevamente.

Figura N°2.9: Pala P&H 4100XPC en proceso de carguío

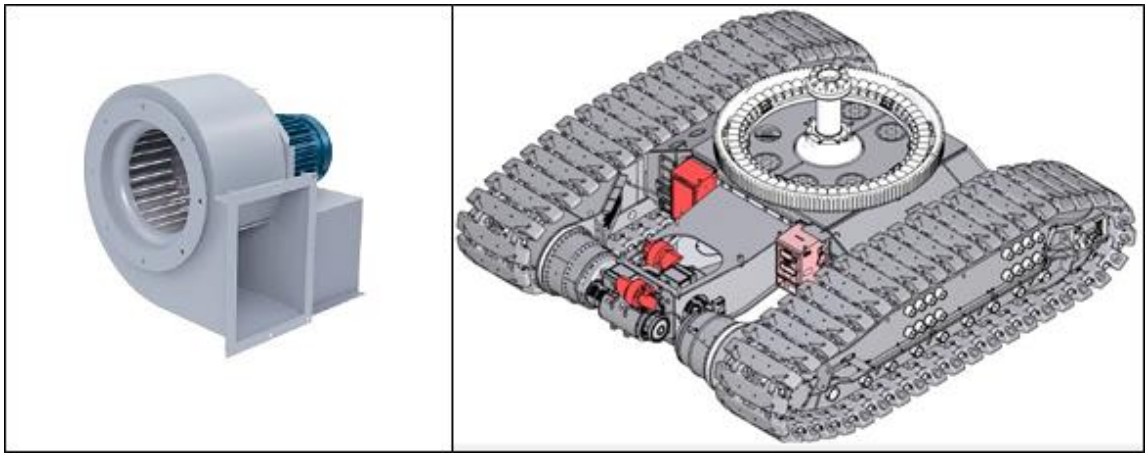
Fuente: Repositorio Komatsu Latinoamérica

2.3 Descripción del sistema de ventilación original, asociado a los motores de propulsión en una pala P&H

Los motores de propulsión están ubicados en el chasis inferior y se encargan de mover ambos bastidores de orugas. El conjunto formado por los bastidores, orugas y sistema de rodado es de considerables dimensiones y peso. Por lo tanto, para poder moverlo utilizan trasmisiones planetarias que, a cambio de disminuir la velocidad de salida del motor, multiplican la fuerza haciéndolos capaces de mover tal conjunto.

A pesar de que los motores junto a las trasmisiones son capaces de realizar el movimiento de las orugas, su naturalidad y el consumo de corriente produce un alza de temperatura en su interior, pudiendo causar daños a su integridad si no es controlada. Debido a esto, cada uno de los motores principales de una pala P&H, tiene implementado un ventilador centrífugo sobre su estructura o lomo, el cual mitiga la temperatura producida debido a su propio funcionamiento. Refiérase a la Figura N°2.10.

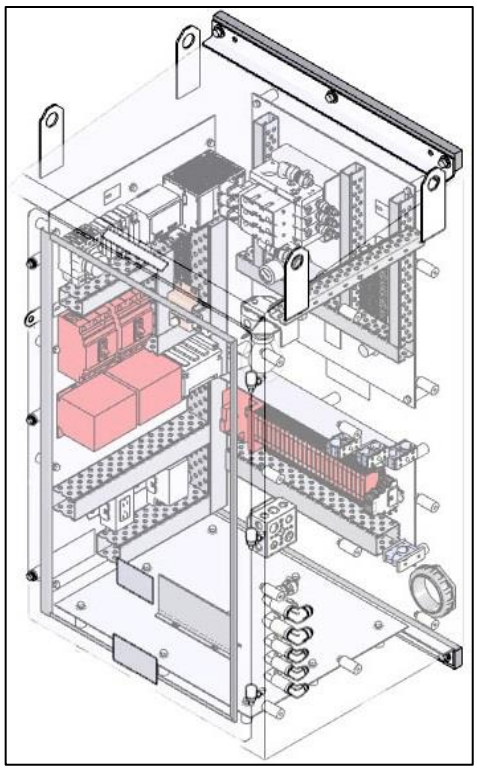
Figura N°2.10: Ventiladores del sistema de propulsión



Fuente: Repositorio Komatsu Mining Corp

Cada vez que el operador cambia a “modo traslación”, el controlador de una pala P&H emite una señal de control que energiza dos unidades de partida, para que ambos ventiladores de propulsión comiencen a funcionar, con un sistema de arranque independiente que consta de un disyuntor trifásico asociado a un contactor y relé térmico. Estos componentes eléctricos se ubican dentro del “gabinete de control inferior”, ubicado también en el chasis inferior del equipo. Refiérase a la Figura N°2.11. Cuando el operador cambia a “modo excavación”, el controlador interrumpe la señal antes mencionada y los ventiladores de propulsión se detienen.

Figura N°2.11: Gabinete de control inferior



Fuente: Repositorio Komatsu Mining Corp

CAPITULO III

PROBLEMÁTICA Y MOTIVACIÓN DE LA PROPUESTA

3.1 Problemática

El sistema de ventilación asociado a los motores de propulsión en una pala P&H es eficaz y entra en funcionamiento cuando el equipo está en "modo traslación". No obstante, tiene deficiencias en su lógica de trabajo, que podrían llegar a ser perjudiciales para estos motores que son componentes vitales dentro del equipo.

Una pala tiene una gran versatilidad en virtud al lugar en donde pueda trabajar, ya que debe soportar niveles extremos de temperatura, polución y altura geográfica entre otros factores. En promedio, una minera chilena situada en altitud geográfica entre 3.000 y 5.500 m.s.n.m., habitualmente tiene que enfrentar períodos con condiciones climáticas adversas que traen consigo fuertes ventiscas, lluvia, nieve e incluso tormentas eléctricas. Lamentablemente, el sistema de ventilación de los motores de propulsión, que está ubicado en la intemperie, no está diseñado ni programado para discernir, si el aire que se va a introducir al interior de los motores está libre o no de agua. El ingreso de este agente externo al interior de los motores, dependiendo de la cantidad, podría generar daños a largo o mediano plazo por corrosión, e incluso generar fallas catastróficas a corto plazo como corto circuitos o fallas a tierra.

El análisis de esta propuesta está basado en las condiciones climáticas y geográficas de una minera situada entre la cuarta y quinta región de Chile hacia el límite fronterizo con argentina, en la cordillera de Los Andes.

3.2 Acciones preventivas de la minera frente a condiciones climáticas adversas

Existen mineras donde se implementan campañas de prevención, para evitar posibles daños a las personas y sus activos, provocados por agentes inherentes durante el desarrollo de condiciones climáticas adversa. Se denomina “Operación Invierno” y define los estándares, protocolos y procedimientos a seguir durante estos períodos.

Son diversos los factores que se tratan dentro de la operación invierno. Para este análisis, solo se estudiarán los niveles de alerta asociados a las condiciones climáticas, que influyen directamente en la continuidad operacional de los equipos mineros, de ahora en adelante enfocado sólo en una pala P&H. Estos niveles de alerta se relacionan a precipitaciones, avalanchas, ventiscas, tormentas, etc. A continuación, se expone una descripción tipo con la criticidad de las alertas y sus directrices.

Figura N°3.1: Representación gráfica de un plan de alertas de una minera

Fuente: Minera estudiada, ubicada en la cuarta Región de Coquimbo

- Medidas de control para la alerta 1: Se mantiene la continuidad operacional dentro de la mina. El personal de operaciones mina debe mantenerse atento al posible empeoramiento climático.
- Medidas de control para la alerta 2: Las operaciones mina se restringen de acuerdo con la evaluación que haga el jefe de operación invierno junto con el jefe turno mina. Generalmente se mantienen trabajando todos los equipos de extracción y transporte de mineral. El personal de operaciones mina, se programa para pernocta en refugios.
- Medidas de control para la alerta 3: Las operaciones mina se mantienen restringidas de acuerdo con la evaluación que haga el jefe de operación invierno junto con el jefe turno mina, quién a la vez, priorizará el cuidado de los equipos mineros móviles, en caso que estén expuestos a ser impactados por una posible avalancha o derrumbe. Generalmente, se mantienen trabajando los equipos de extracción y transporte de mineral que están lejos de zonas sensibles a las precipitaciones o en la parte de menor altitud geográfica de la mina. De esta manera, una pala P&H puede ser detenida preventivamente o evacuada de un área.
- Medidas de control para la alerta 4: Las operaciones mina quedan totalmente suspendidas. Todo el personal de operaciones mina y de operación invierno, se retiran hacia los refugios, desde los cuales no se mueven sin orden expresa del jefe de operación invierno.

En síntesis, al ser alcanzada la alerta cuatro, toda la operación minera queda paralizada y todo el personal debe dirigirse a los refugios. En la zona donde se ubica la minera tomada como ejemplo para el análisis de esta propuesta, la alerta cuatro se alcanzó en dos oportunidades durante el año 2024. Por temas de seguridad, es imperioso que se suspenda toda operación, ya que la integridad de las personas dentro de una compañía siempre será lo más importante.

Sin embargo, entre la alerta uno y dos, la detención de una pala queda sujeta totalmente a criterio del jefe de tuno mina y el jefe de operación invierno. Ocasionalmente, sin siquiera haberse alcanzado niveles altos de precipitaciones que puedan causar desmedro a las personas; por orden del jefe de turno mina, una pala puede quedar detenida preventivamente, para evitar daños en sus motores de propulsión, debido a que el sistema de ventilación asociado podría introducir aire forzado con contenido hídrico.

Las detenciones preventivas basadas en la alerta uno, dos y tres, suman más horas que las detenciones basadas en la alerta cuatro, llegando a alcanzar las 50 horas de detenciones preventivas al año, sólo para evitar posibles estropicios en los motores de propulsión de una pala. Se debe entender que durante el desarrollo de una alerta uno o 2, muchas veces no es necesario detener una pala, ya que las condiciones climáticas no representan fuentes de peligro considerables para las personas. Esto, siempre y cuando se disponga de un sistema climatológico confiable, que pueda advertir de un empeoramiento atmosférico. La minera estudiada cuenta con cuatro estaciones climatológicas internas y privadas, ubicadas todas dentro del valle, perteneciente a la minera.

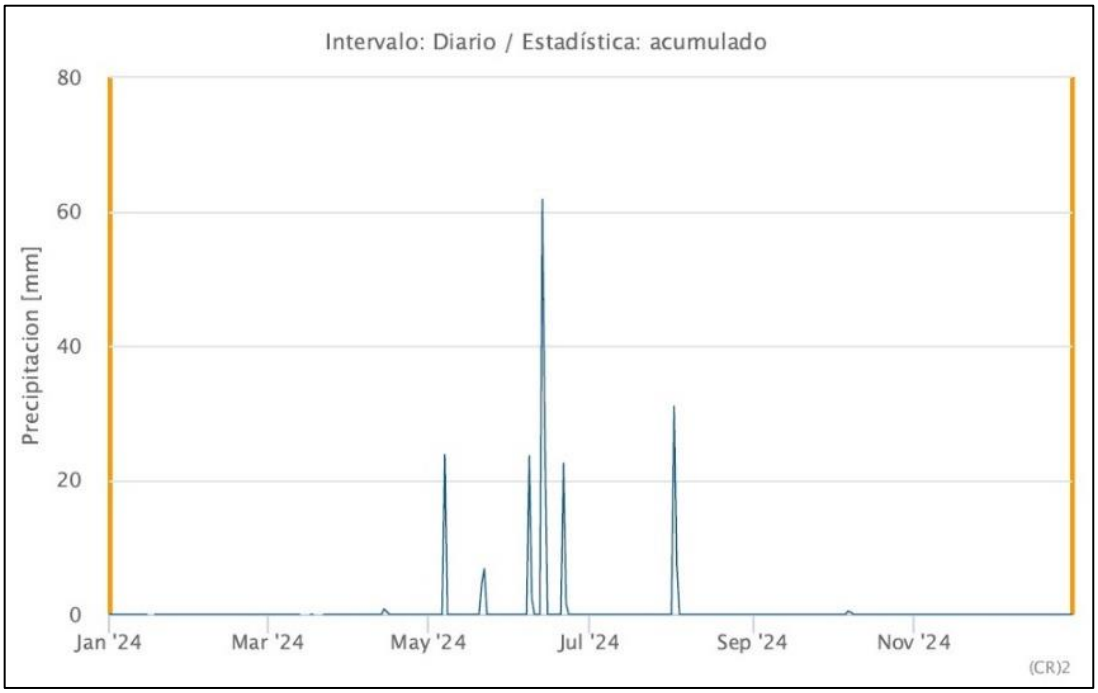
3.3 Registro meteorológico del año 2024

Según el explorador climático CR2, desarrollado por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia de la Universidad de Chile, una estación climatológica ubicada en la cuarta Región de Coquimbo, que es la estación pública más cercana a la minera estudiada, registró durante el año 2024 alrededor de cinco períodos con precipitaciones considerables, llegando a alcanzar los 61,8 mm el 13 de junio y 25,8 mm el 14 de junio. Refiérase a la Figura N°3.2. La estación climatológica de donde se adquirieron los datos, se encuentra ubicada a 45 km lineales de distancia de la minera estudiada y a una altura geográfica de 1.200 m.s.n.m. en comparación a la minera que se ubica a 3.500 m.s.n.m.

Esta diferencia, nos permite estimar que los niveles de precipitaciones en esta minera pudieron haber sido significativamente superiores.

Para una minera que tiene en promedio seis palas P&H detenidas al año durante 50 horas cada una, puede traducirse en pérdidas considerables por detenciones preventivas no programadas. Sin embargo, al mismo tiempo se puede interpretar como una oportunidad de mejora, que motiva la investigación, para encontrar la manera de mitigar estas detenciones no deseadas y, analizar qué tan representativa puede ser una propuesta.

Figura N°3.2: Índice de precipitaciones del año 2024, registradas por estación climatológica pública ubicada en la Región de Coquimbo



Fuente: Explorador climático CR2

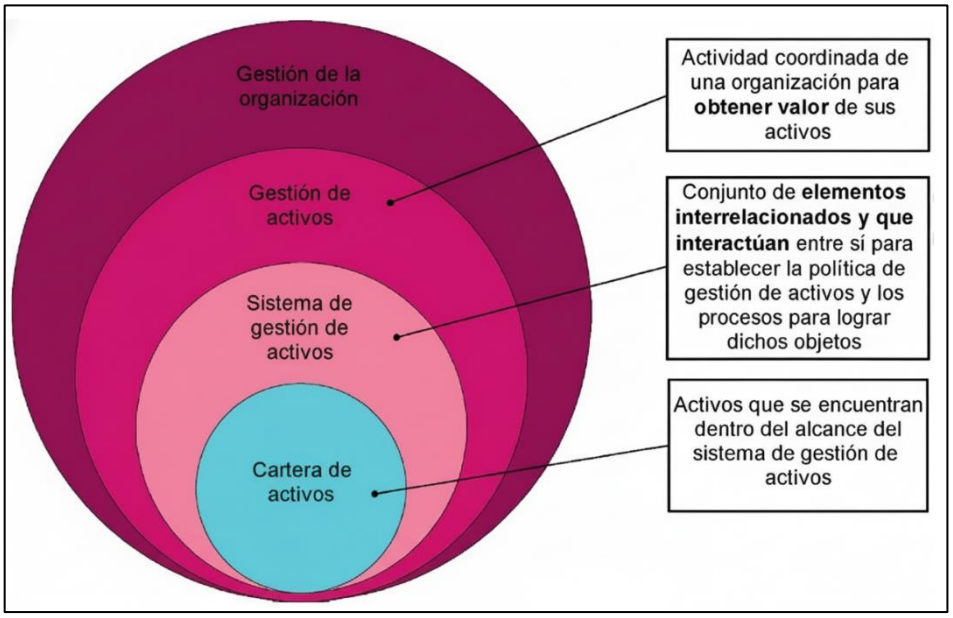
CAPITULO IV

ARGUMENTO DE LA PROPUESTA

4.1 Gestión de Activos

La gestión de activos es la actividad estratégica y operativa de administrar el ciclo de vida de los activos para maximizar su valor, mientras un sistema de gestión de activos es el conjunto organizado de procesos, políticas y herramientas que permiten ejecutar esa gestión de forma sistemática y eficiente, normalmente alineado con los estándares de la Norma ISO 55.000.

Figura N°4.1: Relación del sistema de gestión de activos con la gestión de activos



Fuente: Norma ISO 55.000, primera edición 2014

4.2 Normas ISO 55.000

Tras detectar una condición desfavorable en el sistema de ventilación tratado, no sólo se busca solucionar un problema técnico de funcionamiento deficiente en la pala, sino que también se busca dar un enfoque estratégico en la gestión de activos, fomentando el espíritu de adaptación y eficiencia en la continuidad operacional en la mina.

En adelante, se dará un enfoque a esta Norma ISO 55.000 en base a la propuesta, que busca encontrar la manera de reducir las pérdidas producidas por detenciones no programadas, a través de un sistema de automatización orientado a los motores de propulsión en una pala P&H; componentes que representan un valor significativo como parte del activo de la organización.

Según la Norma ISO 55.000, Primera Edición 2014: "ISO, la Organización Internacional de Normalización, es una federación mundial de organismos nacionales de normalización. Esta Norma Internacional provee los aspectos generales para la gestión de activos y sistemas de gestión de activos. También provee el contexto para las Normas ISO 55.001 e ISO 55.002".

En síntesis, la Norma ISO 55.000 se enfoca en el marco teórico y define los conceptos y términos que forman parte del escrito. La Norma 55.001 se enfoca en los requisitos que se deben cumplir para lograr estándares certificables y la Norma 55.002 es la guía de aplicación que entrega una orientación práctica de como implementar lo mencionado.

4.3 Alineamiento de la propuesta con las Normas 55.001 y 55.002

Las Normas ISO 55.001 y 55.002, establecen los requisitos para un sistema de gestión de activos que permita a las organizaciones, maximizar el valor de sus activos a lo largo de su ciclo de vida, integrando los siguientes aspectos:

- Liderazgo: El liderazgo organizacional es esencial para establecer políticas y estrategias alineadas con la protección y valorización de los activos críticos. Automatizar el sistema de ventilación, busca garantizar la continuidad operacional y evitar interrupciones no programadas, lo que responde directamente a los objetivos organizacionales de eficiencia y confiabilidad. Además, la propuesta refleja el compromiso para con la alta dirección de una organización, con la implementación de recursos tecnológicos y la promoción de una cultura preventiva, tal como lo exige la Norma, favoreciendo la comunicación efectiva entre todos los niveles de la organización y facilitando la mejora continua del sistema de gestión de activos en sí mismo. Así, se fortalece el liderazgo organizacional en la toma de decisiones basadas en el valor y el cuidado de los activos, asegurando la sostenibilidad y competitividad de la empresa.
- Planificación: Ofrece a la organización, la integración a una política y plan estratégico de gestión de activos. Asimismo, se podría alinear la planificación operativa y financiera, justificando inversiones preventivas y asegurando la sostenibilidad del sistema de gestión de activos a largo plazo.
- Apoyo: Depende de la colaboración y coordinación de múltiples áreas dentro de la organización, promoviendo el uso eficiente y compartido de recursos técnicos y humanos. Concientiza a todo el personal de la organización sobre la importancia de la gestión de activos y su impacto en la continuidad operacional. Finalmente, impulsa el desarrollo de competencias técnicas, facilitando la cooperación con recursos humanos y asegurando que el personal involucrado cuente con las capacidades necesarias para implementar, operar y mantener el nuevo sistema.

- Operación: Precisa de la actualización y revisión de las políticas, normas técnicas y procedimientos de gestión de activos, para garantizar que esta innovación quedara formalmente incorporada en el sistema de gestión de activos de la organización. Esto fomenta aún más la normalización del sistema a mejorar. Además, la propuesta contempla la identificación y control de nuevos riesgos derivados de la introducción del sistema automatizado, en línea con las mejores prácticas de gestión del cambio, como disponer de una fuente de alimentación eléctrica compatible o detectar fallos en el nuevo sistema.
- Mejora: Representa una oportunidad de mejora al incorporar tecnología que permite reducir los riesgos operacionales y aumentar la disponibilidad de los activos críticos. Se contempla también la evaluación de riesgos antes de la implementación, asegurando que las acciones correctivas y preventivas sean efectivas y sostenibles a largo plazo. Finalmente, el sistema propuesto favorece la revisión periódica, auditoría y ajuste del sistema de gestión de activos, promoviendo la mejora continua en línea con los objetivos organizacionales y la sostenibilidad del proceso industrial.

4.4 Alineamiento de la Propuesta con la Confiabilidad

Además de tener un óptimo sistema de gestión de activos que maximice el valor de los motores de propulsión durante su vida útil, es de vital importancia priorizar la confiabilidad de estos, y al mismo tiempo la confiabilidad de la pala en sí, asegurando su continuidad operacional dentro de cada jornada y, disminuyendo las interrupciones preventivas no planificadas. Esto aumentaría simultáneamente la disponibilidad operativa.

Dentro del marco en la ingeniería de la confiabilidad, hace década se descubrió la manera de mostrar cómo cambian las probabilidades de que algo ocurra a lo largo del tiempo, a través de un modelo llamado Weibull.

La distribución de Weibull es un modelo estadístico ampliamente utilizado en ingeniería de confiabilidad y a diferencia de la distribución exponencial (que asume una tasa de falla constante), Weibull permite modelar tasas de falla variables, lo que la hace especialmente adecuada para sistemas sujetos a desgaste progresivo. En este caso y para esta propuesta, puede describir el comportamiento de fallas de componentes mecánicos y eléctricos con el transcurso del tiempo, como los motores del sistema de propulsión.

Sólo con saber que la vida media de estos motores es de 38.000 horas, podemos obtener la vida característica y comprender a través de ecuaciones y gráficas, lo importante que es alinearse con la confiabilidad de estos activos, para cumplir con su ciclo de vida esperado y así maximizar el beneficio obtenido a través de ellos.

Matemáticamente, la función de confiabilidad R(t) se define como:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right]$$

donde:

t: tiempo de operación (ubicación en la línea del tiempo, donde se desea saber la confiabilidad).

η: parámetro de escala, vida útil o vida característica.

β: parámetro de forma, que determina el tipo de mecanismo de falla:

β<1: fallas prematuras

β=1: fallas aleatorias

β>1: fallas por desgaste (valor típico en motores por desgaste progresivo).

La vida media o vida media hasta la falla (MTTF), se relaciona con η mediante la función Gamma:

$$MTTF = \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

Dado que los motores tienen un MTTF = 38.000 horas, usaremos esta ecuación para encontrar η. Para el valor de β se asume un valor = 3, que es un valor típico asociado a fallos por desgaste de rodamientos, fatiga y/o aislación en motores eléctricos. Por otra parte, debemos encontrar el valor de la función Gamma (Γ).

Para encontrar Gamma (Γ), se sabe que la relación con la factorial, para cualquier entero positivo n:

$\Gamma(n) = (n-1)!$

Pero para $\left(\frac{4}{3}\right)$, se calcula con una fórmula especial, o con alguna herramienta calculadora:

$\Gamma\left(\frac{4}{3}\right) = \Gamma\left(1 + \frac{1}{3}\right) = \frac{1}{3} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{3}\right)$

Y $\Gamma\left(\frac{1}{3}\right) \approx 2.67894$, así:

$\Gamma\left(\frac{4}{3}\right) = \left(\frac{2.67894}{3}\right) \approx 0.89298$

$\Gamma \approx 0.89298$

Para encontrar Eta (η), con β=3:

$\Gamma\left(1+\frac{1}{3}\right) = \Gamma\left(\frac{4}{3}\right) \approx 0.89298$

Entonces:

$38.000 = \eta \cdot 0.89298$

$\eta \approx 42.580$ horas

Vida característica (η) ≈ 42.580 horas

Cuando β > 1, es esperado y lógico que la vida característica (η) sea mayor que la vida media (MTTF).

Ahora, conociendo el valor de Γ y η podemos obtener el valor de la tasa de falla cuando los motores han llegado a su vida característica, es decir, t = η.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{n}\right)^{\beta}}$$

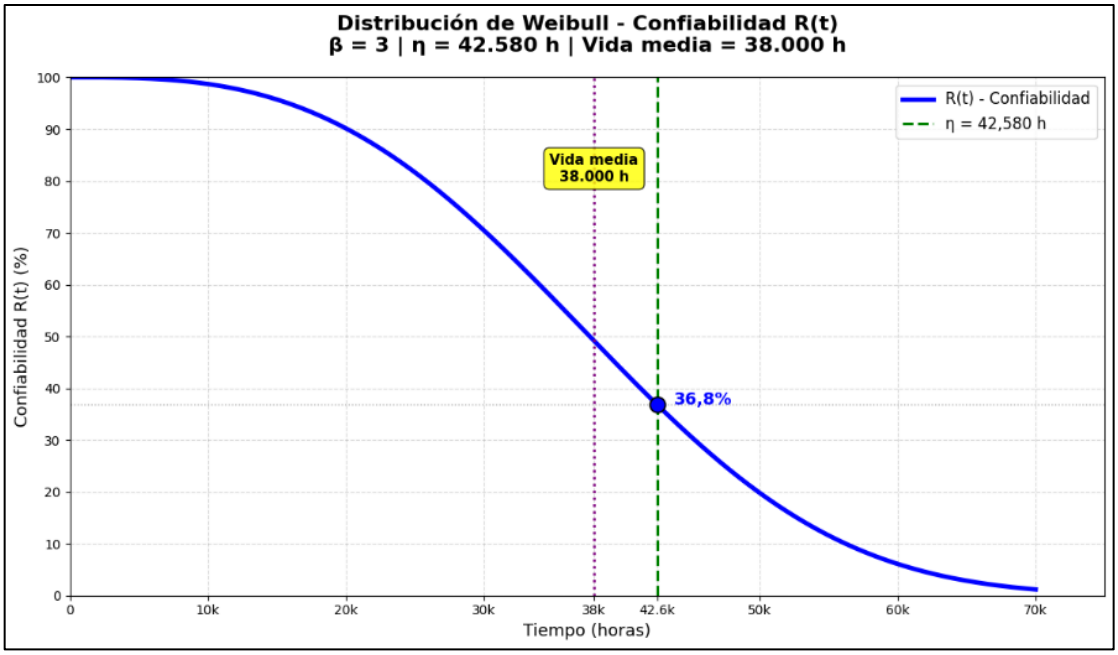
Cuando t = η:

$R(\eta) = e^{-\left(\frac{t}{n}\right)^{\beta}} = e^{-1^{\beta}} = e^{-1} \approx 0.3679$

Y 0.3679 = 36,79% de confiabilidad ⇒ 100% − 36,79% = 63,21% de probabilidad de fallar.

Como $e^{-1} \approx 0.3679$, significa que hay un 63,2% de probabilidad que el motor falle, cuando t = η.

Figura N°4.2: Distribución de Weibull, de la vida útil de los motores de propulsión



Fuente: Confección propia

En el caso de los motores del sistema de propulsión, con una vida media (MTTF) de 38.000 horas y $\beta \approx 3$, que es un valor típico asignado habitualmente a motores eléctricos asociado a desgaste por fatiga y aislamiento, se obtiene $\eta \approx 42.580$ horas, siendo la vida característica de los motores. Refiérase a la Figura N°4.2.

.

Así, la curva de Weibull no solo predice el ciclo de vida, sino que sirve como herramienta de decisión para justificar intervenciones preventivas, como la propuesta de automatización del sistema de ventilación, que protegen la integridad del aislamiento y garantizan el cumplimiento de la vida útil diseñada.

Los motores de propulsión de la pala están diseñados para 38.000 horas de vida media. La curva de Weibull garantiza que, bien cuidados, tienen el 50% de probabilidades de llegar a esa marca. Así también, con una tasa de falla del 63,2%, tienen un 36,79% de probabilidades de igualar o superar las 42.580 horas de vida útil.

Entonces, la propuesta de automatización, busca darle un mayor índice de disponibilidad a la pala durante períodos con precipitaciones, que no representen un peligro para las personas y equipos, evitando detenciones preventivas no programadas. Además, para poder preservar la integridad de los motores y evitar daños instantáneos o el desgaste acelerado, se ofrece un suministro de aire seco a través de la automatización. De esta manera se aumentaría la disponibilidad de la pala, su confiabilidad y se maximizarían los activos durante su ciclo de vida, sin someterlos a niveles de estrés innecesario.

CAPITULO V

DESCRIPCIÓN DEL NUEVO SISTEMA DE VENTILACIÓN AUTOMATIZADO

5.1 Componentes del sistema de automatización

La automatización propuesta, consta de diversos componentes eléctricos que conformarían el sistema de ventilación automatizada, para poder suministrar aire con bajos niveles de humedad, durante periodos con precipitaciones. A continuación, se indican y describen cada uno de ellos.

- Protecciones. La automatización contempla dos interruptores termo magnéticos trifásicos, que ofrecen protección a cada una de las cargas, en caso de generarse una sobre corriente eléctrica o un corto circuito. Además, para las mismas funciones indicadas, se incluye un interruptor termo magnético monofásico para el sistema de control.
- Fuente de poder. Suministra la alimentación de 24 V CC necesaria para que puedan trabajar los componentes de control como: contactores, sensores y controlador. Todo el sistema de control trabajaría con 24 V CC, por ofrecer una mayor confiabilidad operacional y seguridad hacia los técnicos que lo intervendrían.
- Unidades de partida. Cada unidad, constan de un contactor y un relé térmico trifásico conectados entre sí. Cuando se energiza la bobina del contactor con una señal de control, sus contactos de fuerza se cierran y suministran 480 V AC hacia la carga. Si esta señal de control se interrumpe, el suministro de 480 V AC también se interrumpe. El relé térmico, ofrece protección a la carga, en caso de una posible sobrecarga eléctrica que genere un alza de corriente sostenida en el tiempo.

- Sensor de lluvia y temperatura. Un sensor de lluvia ajustable para detectar precipitaciones a partir de los 3 mm, ofrece una línea como señal de control, que se cierra al detectar lluvia, habilitando una de las condiciones necesarias para dar arranque al sistema de automatización. Simultáneamente, un interruptor ajustable de temperatura funciona bajo el mismo principio, al cerrar una línea de control a la temperatura ajustada. Entonces, con ambos interruptores conectados en serie, se logra dar una lógica que permite activar el sistema de automatización cuando existen precipitaciones a una temperatura igual o menor a la ajustada.
- Controlador. Es uno de los dos componentes más importantes dentro de la propuesta. En su configuración tendría el software capaz de controlar el sistema de automatización por completo. Recibe las señales de los sensores de lluvia y temperatura, además de otras condicionantes. Y también, genera las señales necesarias para energizar las unidades de partida y los dámpers motorizados, entre otras. Está en constante funcionamiento, monitoreando la recepción de señales, listo para energizar los actuadores necesarios, según las condiciones climáticas presentadas durante la jornada.
- Dámpers motorizados. Son escotillas motorizados con retorno por resorte. Estos, se energizan para cambiar el suministro de aire desde el sistema original o desde los deshumidificadores hacia los motores de propulsión.
- Ductos de ventilación. Son los encargados de conectar y distribuir el flujo de aire para ventilar los motores de propulsión, proveniente desde el sistema de ventilación original, o desde el sistema deshumidificador.
- Deshumidificador. Es el componente vital de la automatización. Este ofrece un suministro de aire con bajos niveles de humedad, para poder ventilar los motores del sistema de propulsión, cuando las condiciones climáticas representar precipitaciones. Funciona con una alimentación trifásica de 480 V AC, tiene un consumo máximo de corriente de 42,8 Amperios y brinda un flujo de 3.700 m^3/h, siendo compatible con los ventiladores originales. Refiérase a la Figura N°5.1.

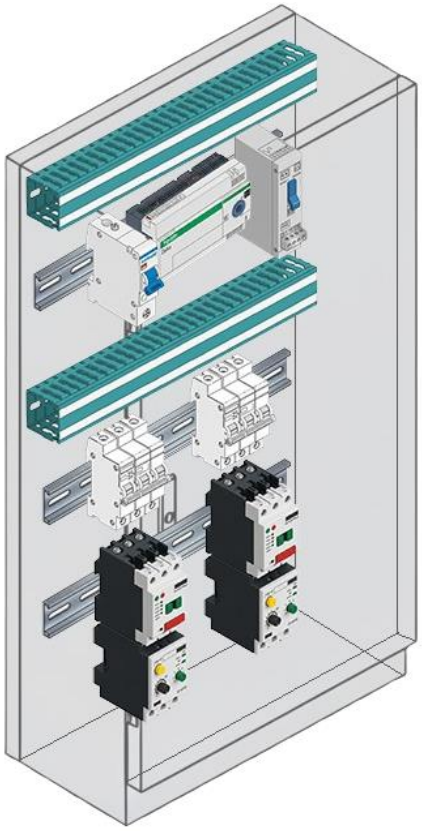
El suministro eléctrico para energizar el sistema automatizado, se realizará desde un centro de carga perteneciente a la pala, el cual tiene interruptores termo magnéticos para tal capacidad en reserva y disponible para este tipo de aplicaciones.

Todos los componentes eléctricos que componen la automatización propuesta, deben cumplir con la norma eléctrica chilena vigente, específicamente el Reglamento de Seguridad de las Instalaciones de Consumo de Energía Eléctrica (RIC) emitido por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC). Éstos, irán montados, ordenados y conectados dentro en un tablero eléctrico, que además de servir de soporte, brindará protección a la integridad de cada uno de ellos. Refiérase a la Figura N°5.2.

Figura N°5.1: Deshumidificador marca Trotec

Fuente: Repositorio Trotec

Figura N°5.2: Tablero de control de la automatización propuesta



Fuente: Integración propia

5.2 Descripción del funcionamiento del sistema de ventilación, con la automatización propuesta implementada

La ventilación de los motores de propulsión de la pala, con el sistema de automatización propuesto teóricamente implementado, tendría dos modos de funcionamiento. Podría trabajar el sistema de ventilación original de la pala o bien, el sistema de ventilación mediante el deshumidificador. A continuación, se describe el funcionamiento de cada uno de los sistemas y cómo se realiza la transición de un modo a otro.

5.2.1 Ventilación en jornadas sin precipitaciones

En jornadas con presiones atmosféricas estables sin precipitaciones, los motores de propulsión son ventilados por el sistema de ventilación original, bajo el siguiente procedimiento. Para el análisis, se consideran sólo las variables asociadas a este sistema de ventilación y se dejan apartadas todas las demás condiciones de la pala.

1. El operador presiona el botón para activar el modo propulsión.
2. La señal del botón llega al controlador original de la pala y también al nuevo controlador de la automatización. Éste último, se mantiene inactivo gracias a las condiciones climáticas estables.
3. Al activar el modo propulsión, el controlador original de la pala genera desde un módulo de entradas y salidas, dos señales de control dirigidas a las bobinas de dos unidades de partidas conformadas por un contactor y un relé térmico, ambos trifásicos y cada unidad correspondiente a un ventilador (izquierdo y derecho).
4. La señal de control dirigida hacia las bobinas de cada unidad de partida, pasa por un contacto normalmente cerrado en cada relé térmico de la misma unidad. De esta forma, al producirse un alza térmica por sobre carga, se abre el contacto del relé térmico e interrumpe la señal que energiza la bobina del contactor y así, se detiene el ventilador con alguna posible amenaza.
5. Cuando las unidades originales de partida se energizan, a través de sus contactos de fuerza, permiten el paso de 480 V AC, proveniente desde dos interruptores termo magnéticos asociados a cada unidad, en dirección a los ventiladores correspondientes.
6. Al energizarse cada ventilador, comienza el proceso de ventilación a través de presión positiva de cada motor de propulsión. De esta manera, durante la utilización de cada motor, se dispone de aire forzado para su enfriamiento.

7. Cuando el operador presiona en la consola nuevamente el botón de propulsión, sale de este modo y entonces, las señales de control dirigidas a las bobinas de las unidades de partidas se interrumpen, terminando con el proceso de ventilación original de los motores de propulsión.

5.2.2 Ventilación en jornadas con precipitaciones

Es de gran importancia, entender que el software del controlador original de la pala es denso y se recomienda no realizar intervenciones, mucho menos modificaciones, que pudieran generar errores y por lo tanto condiciones inseguras para las persona y problemas mayores en el funcionamiento de la pala. Entonces, para inhibir o bloquear el funcionamiento de componentes del sistema de ventilación original, se realizará a través de lógica cableada, la cual no representa mayor dificultad al ser de escala reducida.

Durante jornadas con condiciones climáticas adversas con precipitaciones, los motores de propulsión son ventilados a través del sistema deshumidificador, en la siguiente secuencia.

1. El operador presiona en la consola el botón para activar el modo propulsión.
2. La señal del botón llega de igual manera al controlador original de la pala, y también, al nuevo controlador de la automatización. Éste último, ya se encuentra activo por las precipitaciones.
3. Al activar el modo propulsión, el controlador original de la pala genera igual que antes, las señales de control dirigidas a las bobinas de las unidades de partidas, correspondientes a los ventiladores originales (izquierdo y derecho).
4. Al mismo tiempo, cuando el sensor de lluvia y temperatura detectan condiciones atribuibles a precipitaciones, completan la serie cableada que forman con sus contactos y entonces, la señal de activación llega al nuevo controlador.

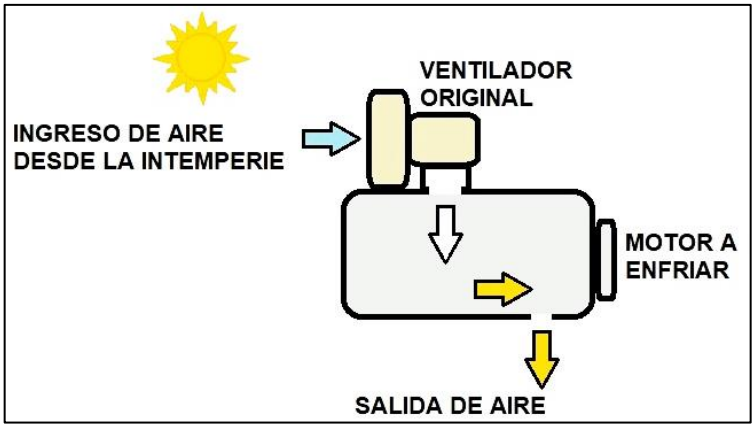
5. El nuevo controlador de la automatización propuesta, al recibir la señal de los sensores, activa el nuevo sistema de ventilación. El controlador, genera desde sus puntos de salidas, dos señales de control dirigidas a las bobinas de dos nuevas unidades de partida, las cuales permiten el paso de los 480 V AC a cada deshumidificador, suplantando así, a los ventiladores originales. La señal que energiza estas unidades, también pasa por un contacto normalmente cerrado de cada relé térmico, para evitar daños por sobre cargas.
6. Para bloquear el funcionamiento de los ventiladores originales, y evitar efectos desfavorables por corrientes de aire opuesto, las señales que energizar las unidades de partida de cada ventilador, pasan por un contacto normalmente cerrado, de cada contactor de las nuevas unidades de partida, así, cuando estas últimas se energizan, interrumpen las señales que energizan los ventiladores originales, inhibiendo su funcionamiento.
7. El nuevo controlador, genera también desde sus puntos de salidas, dos señales de control dirigidas a dos dámpers motorizados, encargados de direccionar el aire presurizado proveniente desde los deshumidificadores, hacia los motores de propulsión, abriendo nuevo paso a éstos y bloqueando el paso hacia los ventiladores originales, que ya están apagados, gracias al bloqueo descrito anteriormente.
8. Al generarse la secuencia descrita, comienza el proceso de ventilación, esta vez, desde los deshumidificadores hacia los motores de propulsión. De esta manera, dichos motores pueden ser enfriados, durante jornada con precipitaciones o altos niveles de humedad en el aire.
9. Si durante el proceso de ventilación a través de los deshumidificadores, las condiciones climáticas cambian y deja de haber precipitaciones. Entonces, la señal de control que pasa por la serie cableada del sensor de lluvia y temperatura, dejará de ser percibida por el nuevo controlador. Esta condición provocará que se interrumpan todas las señales de salida que se habían generado, haciendo que se apaguen ambos deshumidificadores y que los dámpers motorizados vuelvan a su posición original. Bajo este acontecimiento, se activaría automáticamente el sistema de ventilación original durante la marcha. Si las condiciones vuelven a

cambiar y a reaparecer las precipitaciones, esta transición se ejecutará una y otra vez de manera automática, sin necesidad de intervención humana. En consecuencia, aún con la pala en modo excavación, el nuevo controlador estará monitoreando continuamente las señales de los sensores, permitiendo que al momento de activar el modo propulsión, el nuevo sistema esté siempre preparado para actuar.

10. Por otra parte, cuando el operador presiona el botón de propulsión, para salir de este modo, las señales de control que salen del nuevo controlador, se interrumpen exactamente como si fuese una transición automática, terminando con el proceso de ventilación a través de los deshumidificadores.

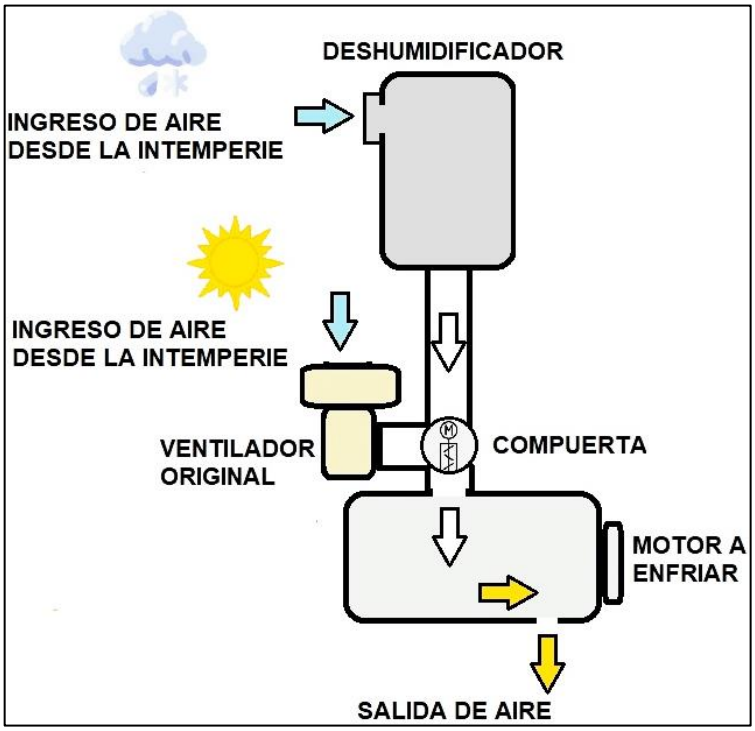
Refiérase a la Figura N°5.3 y a la Figura N°5.4 para poder comparar los cambios del sistema de ventilación original y el sistema de ventilación a través de los deshumidificadores.

Figura N°5.3: Diagrama del sistema de ventilación original



Fuente: Elaboración propia

Figura N°5.4: Diagrama del sistema de ventilación con deshumidificación



Fuente: Elaboración propia

CAPITULO VI

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN

6.1 Método Monte Carlo

En este capítulo, se llevará a cabo el análisis del potencial impacto que podría generar la automatización propuesta, como la posible mejora de la continuidad operacional de una minera y el ahorro monetario al evitar detenciones apresuradas. Como la automatización es una propuesta que no se va a construir, se debe buscar la manera teórica de saber que tan beneficioso podría ser en virtud de la disponibilidad de una pala. Una manera de lograrlo es el método Monte Carlo.

Según el Libro Preparación y Evaluación de Proyectos, Sexta Edición 2014: "Modelo de Monte Carlo (o método de ensayos estadísticos), es una técnica de simulación de situaciones inciertas que permite definir valores esperados para variables no controlables, mediante la selección aleatoria de valores".

Para trabajar con este modelo, primero debemos definir conceptos y parámetros, como la media y desviación estándar de los días con precipitaciones desde el año 2001 al 2024. De esta manera, podremos darle un enfoque o dirección al método Monte Carlo para la generación de valores aleatorios.

6.2 Preparación de datos históricos

Se dispone de una serie de datos históricos, obtenida de una estación meteorológica ubicada en la periferia de una minera, situada entre la cuarta y quinta región de Chile hacia el límite fronterizo con argentina, en la cordillera de Los Andes. El registro, es una tabla que contiene datos diarios de la cantidad de precipitaciones, desde el 01 de enero del año 2001 hasta el 31 de diciembre del año 2024. Tiene 4 columnas ordenadas por año, mes, día y cantidad de precipitaciones registradas. El archivo es un formato Excel de Microsoft Office, por lo tanto, todo el procesamiento de datos se realizará con las herramientas de este software. Además de los registros históricos, se estima que actualmente y en cada año, se producen 50 horas aproximadamente de detenciones, por condiciones meteorológicas con lluvia y/o nieve.

Es importante entender que el concepto de precipitación se refiere a cualquier forma de agua que cae a la superficie terrestre, cómo lluvia, nevada, llovizna, granizos, etc. Para esta propuesta los granizos quedan excluidos, siendo contemplada sólo el agua en forma líquida y cristalizada (nieve). También, se debe considerar que aproximadamente un centímetro de nieve, equivale a un milímetro de lluvia. Por lo tanto, si está nevando, a medida que la nieve reposa en el captador del sensor de precipitaciones, se iría derritiendo y se mediría como lluvia.

Con estos antecedentes, se comienza segregando los días lluviosos según su intensidad, para definir cuáles podrían y cuales no, obligar a detener la pala apresuradamente, bajo el criterio humano. Para esto, se estudian categorizaciones de lluvias según su intensidad (mm/h), de fuente nacionales e internacionales, las cuales presentan diferencias entre una y otra.

Entonces, se realiza un ajuste a conveniencia propia para el buen funcionamiento del sistema deshumidificador, logrando que sea capaz de funcionar dentro de rangos adecuados y sin exponerse a niveles extremos de precipitaciones innecesariamente, ya que por seguridad y en esas condiciones, la operación minera se detiene por completo. En síntesis, se logra estimar la siguiente categorización:

Tabla N°6.1: Definición de los tipos de lluvia por intensidad

Nivel de lluvia	Cantidad de mm/h
Lluvia muy leve	$0 < \text{valor} < 3$ mm
Lluvia leve	$3 \leq \text{valor} \leq 5$mm
Lluvia moderada	$5 < \text{valor} \leq 10$ mm
Lluvia fuerte	valor > 10 mm

Fuente: Integración propia

Para definir la "lluvia muy leve", se tomaron dos consideraciones. Primero, es un nivel de precipitación muy bajo, que incluso podría ser una lluvia intermitente o incipiente, siendo excluida como condicionante dentro del funcionamiento del sistema deshumidificador. Además, y como segunda consideración, el sensor que utilizaría la propuesta de automatización, tiene un ajuste de reconocimiento de precipitación que parte desde los 3 mm/h en adelante, siendo este el parámetro mínimo inicial y reconocible como precipitación para la propuesta.

6.3 Cálculo de la media de días lluviosos históricos

Con los conceptos, consideraciones y los niveles de lluvia definidos, ya se puede calcular el primer parámetro para trabajar con el modelo Monte Carlo: la media de los días lluviosos históricos (μ).

Refiérase a la Tabla N°6.2, para visualizar una muestra del año 2024, según el registro histórico.

Tabla N°6.2: Muestra de datos, obtenidos de la estación meteorológica

año	mes	dia	valor
2024	6	7	0
2024	6	8	23,6
2024	6	9	2,4
2024	6	10	0
2024	6	11	0
2024	6	12	0
2024	6	13	61,8
2024	6	14	25,8
2024	6	15	0
2024	6	16	0
2024	6	17	0
2024	6	18	0
2024	6	19	0
2024	6	20	0
2024	6	21	22,5
2024	6	22	1,6
2024	6	23	0

Fuente: Base de datos del explorador climático CR2

Inicialmente, se deben clasificar los datos históricos registrados por su intensidad. Para esto, se agregan cinco columnas adicionales, ordenada y con las siguientes reglas.

- lluvia_binario: 1 si valor > 0 mm
- muy leve: 1 si 0 < valor ≤ 3 mm
- leve: 1 si 3 < valor ≤ 5 mm
- moderada: 1 si 5 < valor ≤ 10 mm
- fuerte: 1 si valor > 10 mm

Tabla N°6.3: Columnas adicionales con categorización de precipitaciones, por nivel de intensidad

año	mes	dia	valor	lluvia_binario	muy leve	leve	moderada	fuerte
2024	6	7	0	0	0	0	0	0
2024	6	8	23,6	1	0	0	0	1
2024	6	9	2,4	1	1	0	0	0
2024	6	10	0	0	0	0	0	0
2024	6	11	0	0	0	0	0	0
2024	6	12	0	0	0	0	0	0
2024	6	13	61,8	1	0	0	0	1
2024	6	14	25,8	1	0	0	0	1
2024	6	15	0	0	0	0	0	0
2024	6	16	0	0	0	0	0	0
2024	6	17	0	0	0	0	0	0
2024	6	18	0	0	0	0	0	0
2024	6	19	0	0	0	0	0	0
2024	6	20	0	0	0	0	0	0
2024	6	21	22,5	1	0	0	0	1
2024	6	22	1,6	1	1	0	0	0
2024	6	23	0	0	0	0	0	0
2024	6	24	0	0	0	0	0	0
2024	6	25	0	0	0	0	0	0

Fuente: Integración propia

De esta manera, la columna “lluvia_binario” reflejará con “1” cualquier día que tenga precipitaciones registradas mayores que 0 mm a lo largo de ella, equivalente a un día lluvioso desde el año 2001 al 2024, sin considerar la cantidad de esta. La columna “muy leve” reflejará con “1” cualquier día que tenga precipitaciones registradas igual e inferiores a 3 mm. La columna “leve” reflejará con “1” cualquier día que tenga precipitaciones registradas mayores que 3 mm e, igual e inferiores a 5 mm. La columna “moderada” reflejará con “1” cualquier día que tenga precipitaciones registradas mayores que 5 mm e, igual e inferiores a 10 mm. Por último, la columna “fuerte” reflejará con “1” cualquier día que tenga precipitaciones registradas mayores que 10 mm.

A partir de la categorización de las precipitaciones, y a través de una Tabla Dinámica, se agrupan por años la cantidad de días lluviosos, según su intensidad. Por ejemplo, en el año 2024 hubo 14 días lluviosos, de los cuales 5 fueron muy leves, 1 leve, 2 moderados y 6 fuertes. Refiérase a la Tabla N°6.4

Tabla N°6.4: Conteo anual de lluvia, según su intensidad

Etiquetas de fila	Suma de lluvia_binario	Suma de muy leve	Suma de leve	Suma de moderada	Suma de fuerte	Suma de valor
2001	19	7	3	0	9	323,4
2002	43	17	4	6	16	543,5
2003	19	9	4	2	4	202,3
2004	26	11	1	5	9	223,3
2005	39	13	6	9	11	341,9
2006	4	3	0	1	0	11
2007	31	31	0	0	0	83,7
2008	14	7	0	2	5	208,9
2009	20	5	3	3	9	234
2010	25	9	5	5	6	176,3
2011	32	16	6	3	7	221
2012	22	11	3	4	4	96,5
2013	20	8	5	3	4	143,4
2014	17	7	1	5	4	111,3
2015	29	14	2	6	7	281,8
2016	34	16	1	11	6	319,7
2017	26	11	3	7	5	186,2
2018	16	6	3	2	5	133
2019	13	10	2	0	1	33,6
2020	3	1	1	0	1	17,3
2021	14	7	4	3	0	44,5
2022	21	7	3	4	7	193
2023	20	12	0	4	4	93,9
2024	14	5	1	2	6	212,8
Total general	**521**	**243**	**61**	**87**	**130**	**4436,3**

Fuente: Integración propia

Con esta agrupación, ahora se puede obtener un factor clave de conversión, necesario para convertir los días lluviosos en horas de detención por cada uno de estos días. Se debe considerar que actualmente, sin la propuesta de automatización, se estima que las detenciones al año son de 50 horas en promedio.

En la siguiente tabla, se confecciona un resumen anual con tres columnas influyentes, donde se realiza una sumatoria que define por cada año, la cantidad de días con precipitaciones igual o mayores a 3 mm, mayores a 5 mm y mayores a 10 mm. Se debe recordar que se excluye todo día con precipitaciones inferiores a 3 mm. Refiérase a la Tabla N°6.5.

Tabla N°6.5: Sumatoria de días lluviosos, según su intensidad

Año	Días ≥3mm	Días >5mm	Días >10mm
2001	12	9	9
2002	26	22	16
2003	10	6	4
2004	15	14	9
2005	26	20	11
2006	1	1	0
2007	0	0	0
2008	7	7	5
2009	15	12	9
2010	16	11	6
2011	16	10	7
2012	11	8	4
2013	12	7	4
2014	10	9	4
2015	15	13	7
2016	18	17	6
2017	15	12	5
2018	10	7	5
2019	3	1	1
2020	2	1	1
2021	7	3	0
2022	14	11	7
2023	8	8	4
2024	9	8	6
Media	11,583	9,042	5,417

Fuente: Integración propia

Basados en las sumatorias y considerando que todos los días con precipitaciones igual o mayores a 3 mm, son los que podrían eventualmente forzar la detención de una pala, calculamos a través de las herramientas de Excel la media (μ) de esta sumatoria, lo que nos indica el promedio de días lluviosos desde el año 2001 al 2024 (días lluviosos históricos). Con este dato, podemos decir que desde el año 2001 a la actualidad, una pala se detiene anualmente en promedio 11,58 días, por precipitaciones iguales o mayores a 3 mm, al no contar con un sistema automatizado en la ventilación de los motores de propulsión.

Entonces, si las 50 horas actuales de detenciones al año, se dividen por la media de los días lluviosos históricos, obtenemos las horas de detención por cada día con precipitaciones igual o mayores a 3 mm anuales, sin la automatización propuesta.

$$\frac{\text{horas de detenciones sin propuesta al año}}{\text{días promedio con lluvias (históricos)}} = \text{horas por cada día lluvioso al año}$$

$$\frac{50}{11{,}583} = 4{,}317 \text{ horas}$$

Con el factor de conversión calibrado e igual a 4,317 horas por día lluvioso al año, podemos obtener también las horas de detenciones al año considerando sólo los días con precipitaciones mayores a 5 mm y a 10 mm. Este cálculo nos ayudará más adelante a simular diferentes escenarios futuros, respecto al rendimiento esperado de la automatización propuesta. Para aquello, debemos multiplicar las horas por cada día lluvioso (4,317 horas), por el promedio histórico de los días con precipitaciones mayores a 5 mm y a 10 mm respectivamente. Así, se obtienen los siguientes valores:

(Horas por cada día lluvioso) * (promedio histórico de días con precipitaciones > 5mm)

4,317 (horas) * 9,042 (días) = 39,029 horas

Por lo tanto, los días lluviosos históricos con precipitaciones mayores a 5 mm, representarían 39,029 horas de detenciones cada año.

(Horas por cada día lluvioso) * (promedio histórico de días con precipitaciones > 10mm)

4,317 (horas) * 5,417 (días) = 23,381 horas

Para este caso, los días históricos con precipitaciones mayores a 10 mm, representarían sólo 23,381 horas de detenciones cada año.

Ahora, se cuenta con la media (μ) de los días lluviosos históricos, que es uno de los dos parámetros que necesitamos para trabajar con el método Monte Carlo, y adicionalmente, se sabe cuántas horas de detenciones al año producen los días con precipitaciones, según su intensidad.

6.4 Modelado de la incertidumbre

La incertidumbre es la nula certeza de lo que podría pasar en un futuro. Por lo tanto, para simular datos aleatorios con el método Monte Carlo, además de tener la media (μ), debemos buscar la manera de dar un indicador al software, para que refleje la variabilidad meteorológica entre años secos y años lluviosos, y pueda aportar datos coherentes que sigan la tendencia histórica.

La incertidumbre climática se puede cuantificar mediante la desviación estándar (σ) histórica de los días lluviosos con precipitaciones ≥ 3 mm desde el año 2001 al 2024. La desviación estándar, mide cuanto se aparta en promedio cada año del valor medio histórico (μ = 11,58 días). Al realizar el cálculo con herramientas internas de Excel, arroja una desviación estándar de 6,55 días para cada año. Refiérase a la Tabla N°6.6.

Tabla N°6.6: Desviación estándar de días lluviosos históricos, según su intensidad

Año	Días ≥3mm	Días >5mm	Días >10mm
2001	12	9	9
2002	26	22	16
2003	10	6	4
2004	15	14	9
2005	26	20	11
2006	1	1	0
2007	0	0	0
2008	7	7	5
2009	15	12	9
2010	16	11	6
2011	16	10	7
2012	11	8	4
2013	12	7	4
2014	10	9	4
2015	15	13	7
2016	18	17	6
2017	15	12	5
2018	10	7	5
2019	3	1	1
2020	2	1	1
2021	7	3	0
2022	14	11	7
2023	8	8	4
2024	9	8	6
Media	11,583	9,042	5,417
Desv.est	6,551	5,609	3,696

Fuente: Integración propia

Para poder calcular la desviación estándar, se adoptó una distribución normal truncada en cero, lo que fuerza al software a tener que arrojar sólo valores iguales o superiores a 0 (mm de precipitaciones) permitiendo que, al momento de generar datos para simular escenarios futuros, se haga con valores realistas y se eviten sesgos con niveles de precipitaciones negativos.

Ahora que se cuenta con ambos parámetros pertenecientes a la distribución normal: media y desviación estándar, se pueden obtener las reglas matemáticas y porcentajes de los datos que se encuentran entre la media, siendo indicadores inherentes de esta distribución. Refiérase a la Tabla N°6.7.

- μ (media): 11,58 días
- σ (desviación estándar): 6,55 días

Tabla N°6.7: Regla matemática de la desviación estándar con distribución normal, para días lluviosos con precipitaciones ≥ 3 mm

Intervalo	Regla matemática exacta	Porcentaje de años que caen dentro
μ ± 1 σ	11,58 ± 6,55 → 5,03 a 18,13 días	68,27%
μ ± 2 σ	11,58 ± 13,10 → −1,52 a 24,68 días	95,45%
μ ± 3 σ	11,58 ± 19,65 → −8,07 a 31,23 días	99,73%

Fuente: Integración propia

Entonces, según la regla empírica de la distribución normal, el 68 % de los años 2001 al 2024 tuvieron entre 5 a 18 días lluviosos con precipitaciones ≥ 3 mm. Y, el 95 % de los años 2001 al 2024 tuvieron entre 0 a 25 días lluviosos con precipitaciones ≥ 3 mm aproximadamente.

Adicionalmente, se obtiene la desviación estándar de los días lluviosos históricos con precipitaciones mayores a 5 mm y a 10 mm respectivamente. Este cálculo, servirá como referencia al momento de generar los datos aleatorios, respecto a la simulación de los escenarios futuros. Se deben seguir las mismas reglas con los valores de la desviación estándar correspondiente. Refiérase a la Tabla 6.6 para ver cada media y desviación estándar. Refiérase a la Tabla N°6.7 para aplicar cada regla.

Así, el 68 % de los años 2001 al 2024 tuvieron de 3 a 14 días lluviosos con precipitaciones > 5 mm. Y, el 95 % de 0 a 20 días lluviosos con la misma intensidad aproximadamente. Por último, el 68 % de los años 2001 al 2024 tuvieron de 1 a 9 días lluviosos con precipitaciones > 10 mm. Y, el 95 % de 0 a 12 días lluviosos con esta intensidad. Con estos valores, ahora se pueden generar datos aleatorios dentro de un rango, que nos ayuden a simular escenarios bajo ciertas condiciones.

6.5 Simulación de Escenarios

Sabiendo los valores de la media y desviación estándar de los días lluviosos históricos, es posible obtener datos aleatorios con el método Monte Carlo. Primero, se va a denominar y definir las condiciones actuales y los resultados esperados de cada escenario a simular, de la siguiente manera:

6.5.1 Escenario 1 (original)

Representa la actualidad, sin un sistema de automatización. Debido a los días lluviosos con precipitaciones ≥ 3 mm, tiene detenciones al año de 50 horas aproximadamente. Presenta una media de 11,58 días con precipitaciones de esta intensidad, y una desviación estándar de 6,55 días.

6.5.2 Escenario 2 (simulación 1)

Es el primer escenario simulado con la automatización implementada. Tiene un rendimiento regular, capaz de mitigar sólo las precipitaciones leves, desde los 3 a los 5 mm. Teniendo esta capacidad, podemos asumir que sólo los días con precipitaciones mayores a 5 mm, son los que podrían potencialmente forzar la detención de la pala. Esto, permite alinear el escenario 2 con la media histórica de días con precipitaciones > 5 mm, por ende, también con su desviación estándar:

- μ (media): 9,042 días
- σ (desviación estándar): 5,609 días

Con estos dos parámetros, y mediante la aplicación de una fórmula de Excel, se generan 50.000 datos aleatorios, correspondiente cada uno de ellos a días con precipitaciones > 5 mm por año. Esta ejecución se basa en una media de 9,042 días con una desviación estándar de 5,609 días. La fórmula de Excel a utilizar es la siguiente:

"=MAX(0; DISTR.NORM.INV(ALEATORIO();9,041667;5,608618))"

Posteriormente, cada uno de estos nuevos datos debe ser multiplicado por el factor de conversión obtenido anteriormente, cuyo valor es igual a 4,317 [horas por día lluvioso al año]. Así, obtenemos para cada nuevo dato las horas de detenciones al año, considerando sólo los días con precipitaciones mayores a 5 mm. Luego, promediando las nuevas 50.000 horas, obtenemos una media igual a 39,62 horas de detenciones al año.

Es imperioso entender que 39,62 horas de detenciones al año, en comparación con las 39,029 horas obtenidas con anterioridad en el Capítulo 6.3, se diferencian ya que este último valor fue calculado con sólo un valor de media multiplicado por el factor de conversión para transformarla en horas. En cambio, las 39,62 horas se obtuvieron a través del método Monte Carlo, después de procesar 50.000 datos, lo que ofrece una mayor solidez y realismo.

6.5.3 Escenario 3 (simulación 2)

Es el segundo escenario simulado con la automatización implementada, pero esta vez con un rendimiento óptimo, capaz de mitigar no solo las precipitaciones leves, sino que también las moderadas, desde los 3 a los 10 mm. Con esta mayor capacidad, podemos asumir que sólo los días con precipitaciones mayores a 10 mm, son los que podrían eventualmente forzar la detención de la pala. Y como en el caso anterior, esto permite alinear el escenario 3 con la media histórica de días con precipitaciones > 10 mm, y con su desviación estándar:

- μ (media): 5,417 días
- σ (desviación estándar): 3,696 días

De la misma manera que el escenario 2, mediante la aplicación de una fórmula de Excel, se generan 50.000 datos aleatorios, correspondiente cada uno de ellos a días con precipitaciones > 10 mm por año, basada en una media de 5,417 días y una desviación estándar de 3,696 días. La fórmula de Excel utilizada es la siguiente:

“=MAX(0; DISTR.NORM.INV(ALEATORIO();5,416667;3,695906))”

Así mismo, cada uno de estos nuevos datos debe ser multiplicado por el factor de conversión obtenido anteriormente, cuyo valor es igual a 4,317 [horas por día lluvioso al año]. Así, obtenemos para cada nuevo dato las horas de detenciones al año, considerando sólo los días con precipitaciones mayores a 10 mm. Luego, se promedian las nuevas 50.000 horas, para reflejar una media igual a 24,05 horas de detenciones al año.

Por último y nuevamente, si comparamos las 24,05 horas de detenciones al año, con las 23,381 horas obtenidas con anterioridad en el Capítulo 6.3, se diferencian por la misma causa, ya que este último valor fue calculado con sólo un valor de media multiplicado por el factor de conversión para transformarla en horas. En cambio, las 24,05 horas se obtuvieron a través del método Monte Carlo, después de procesar 50.000 datos. Refiérase a la Tabla N°6.8 y Tabla N°6.9, para ver una muestra de los escenarios simulados y un resumen de los escenarios simulados respectivamente.

Tabla N°6.8: Muestra de escenarios simulados

Año simulado	Días Esc.1	Días Esc.2	Días Esc.3	Días a horas	Días a horas	Días a horas
1	10,803	20,783	8,461	46,630	89,709	36,524
2	10,427	10,369	0,979	45,007	44,757	4,228
3	13,550	13,444	4,224	58,488	58,031	18,234
4	10,862	6,778	7,559	46,888	29,258	32,629
5	21,268	15,032	9,946	91,806	64,888	42,932
6	20,835	2,768	5,257	89,936	11,948	22,693
7	11,036	4,396	5,150	47,637	18,977	22,230
8	1,305	9,444	0,105	5,634	40,764	0,454
9	14,466	5,365	5,417	62,442	23,160	23,382
10	11,775	19,851	6,703	50,828	85,687	28,932
11	7,949	8,019	7,931	34,312	34,614	34,236
12	7,983	7,260	9,614	34,459	31,339	41,501
13	8,286	6,843	12,690	35,765	29,538	54,776
49988	6,131	15,213	4,859	26,463	65,666	20,974
49989	18,352	1,853	7,194	79,217	8,000	31,054
49990	9,500	0,695	0,000	41,009	2,998	0,000
49991	15,256	13,676	6,006	65,855	59,033	25,924
49992	23,143	0,000	8,914	99,897	0,000	38,479
49993	2,613	19,359	13,539	11,279	83,562	58,443
49994	14,709	11,472	7,843	63,491	49,520	33,857
49995	8,084	9,959	6,411	34,896	42,990	27,675
49996	4,189	5,390	4,854	18,080	23,265	20,954
49997	11,454	6,640	13,159	49,441	28,661	56,801
49998	0,000	10,434	12,458	0,000	45,037	53,778
49999	10,261	2,972	4,684	44,294	12,827	20,218
50000	13,327	11,481	7,523	57,527	49,556	32,475

Fuente: Integración propia

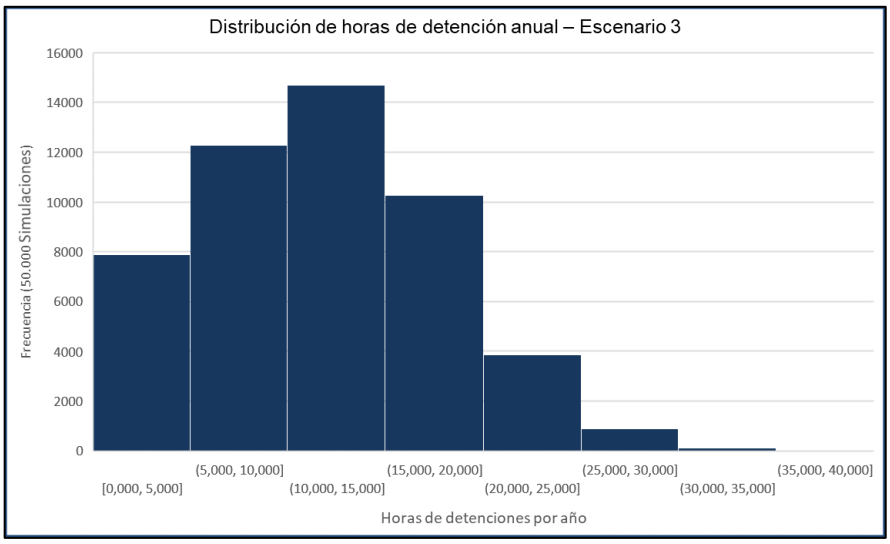
Tabla N°6.9: Resumen de escenarios simulados

Escenario	Capacidad (hasta)	Media - días de detenciones al año	Media - horas de detenciones al año
1 - operación actual sin automatización	3 mm	11,58	50
2 - con automatización y rendimiento regular	5 mm	9,04	39,63
3 - con automatización y rendimiento óptimo	10 mm	5,42	23,94

Fuente: Integración propia

El siguiente histograma asociado al escenario 3, que ofrecería mejores resultados, y en el que estará el foco de ahora en adelante, muestra los 50.000 nuevos datos aleatorios generados con el método Monte Carlo, a través de Excel. El gráfico refleja la distribución de las horas de detenciones al año, en donde la pala se detendría sólo por precipitaciones mayores a 10 mm. Cada columna del eje x, representa un rango de horas de detenciones ajustado a 5 horas, y en el eje y se indica la frecuencia o cantidad de datos generados por cada rango.

Figura N°6.1: Histograma de distribución, escenario 3



Fuente: Integración propia mediante Excel

Por añadidura, y sacando máximo provecho de los datos simulados, también se pueden calcular los percentiles P5 y P95 con herramientas dentro del mismo software, para representar un intervalo de confianza del 90% o hablar de 9 de cada 10 años, y estimar los riesgos ligados a la variabilidad meteorológica.

- Percentil 5 (5%): 4,45 horas
- Percentil 95 (95%): 49,62 horas

Basados en el escenario 3, que tendría un óptimo rendimiento, y en el que la pala solo se detendría por precipitaciones superiores a 10 mm, la simulación realizada con el método Monte Carlo indica que en 9 de cada 10 años futuros las detenciones anuales por precipitaciones estarían entre 4,5 y 49,8 horas (percentiles 5% y 95%). O también, que un 5% de los años futuros estaría por debajo de las 4,5 horas de detención, lo que representaría un año seco. Por otra parte, sólo un 5% de los años futuros estaría por encima de las 49,62 horas de detención, lo que se podría asumir como un año potencialmente lluvioso.

Otro cálculo sencillo, pero no menos representativo, es filtrar la media de las horas de detenciones al año por precipitaciones superiores a 10 mm, pero, que arbitrariamente no superen las 30 horas. Luego, este valor se divide por el total de datos generados aleatoriamente (50.000). Esto, permite calcular cuantas detenciones por debajo de las 30 horas sería capaz de mantener la automatización con rendimiento óptimo. El cálculo obtenido es igual a un 66%. Con esto, formulamos la idea de que, en 2 de cada 3 años futuros, la automatización óptima sería capaz de mantener las detenciones por debajo de las 30 horas.

6.6 Ahorros potenciales

Después de haber sumillado el escenario 3 con Monte Carlo, existe una noción más sólida de los días y horas de detenciones que la automatización podría evitar, si esta tuviera un óptimo rendimiento.

Si a las 50 horas actuales de detenciones al año, que equivalen a la media actual, se le resta la media de horas de detención al año del escenario 3, obtenemos la media de reducción de horas anuales, producto de la automatización óptima de este escenario.

Media de detenciones actuales – media de detenciones esc. 3 = media de horas de ahorro

50 (horas actuales) – 24,05 (horas escenario 3) = 26,21 horas

Por lo tanto, el escenario 3, que tiene un rendimiento óptimo, y en el que la pala se detiene sólo por precipitaciones superiores a 10 mm, sería capaz de lograr un ahorro medio de 26,21 horas al año, equivalente al 52,4% de reducción.

Actualmente, puede ser complejo valorizar las pérdidas por detenciones imprevistas de equipos de extracción, al haber numerosos factores directamente influyentes involucrados, como el rendimiento de la pala o el tipo y valor actual del material extraído, entre otros. Sin embargo, según fuentes de la gran minería, se estima que el costo de cada hora de detención no programada, de una pala eléctrica P&H 4100XPC, que esté extrayendo mineral de alta ley y siendo enviado directamente al proceso de chancado, puede llegar a tener un costo para una minera de hasta 180.000 USD aproximadamente.

Entonces, para obtener el ahorro medio anual de los años futuros del escenario 3, multiplicamos las horas de ahorro medio por la cifra estimada de 180.000 USD.

26,21 (horas de ahorro medio, esc. 3) * 180.000 USD = 4.717.800 USD

Con esta cifra, podemos deducir que para el escenario 3, el ahorro medio de cada año futuro podría ser de 4,71 Millones USD, con sus fluctuaciones inherentes, producto de la variabilidad meteorológica.

Calculamos los percentiles P5 y P95, para representar el intervalo de confianza del 90%, para volver a estimar los riesgos por la variabilidad meteorológica, pero esta vez de los ahorros.

- Percentil 5 (5%): 0,1 Millones USD
- Percentil 95 (95%): 9,1 Millones USD

Por consecuencia y para el escenario 3, que representa una automatización óptima, en 9 de cada 10 años futuros, los ahorros anuales estarían entre 0,1 y 9,1 Millones USD. O bien, sólo un 5% de los años futuros más adversos estarían por debajo de los 0,1 M USD. Y, de forma contraria, sólo un 5% de los años futuros más favorables estarían por encima de los 9,1 M USD.

CONCLUSIONES

Hoy en día, la industria minera exige una continuidad operacional con altas metas y exigencias, que puede llevarse a cabo sólo con procesos productivos que tengan los más altos estándares en la industria. En este caso, una pala minera P&H 4100XPC juega un papel crucial, al representar una etapa fundamental en el proceso de producción de minerales altamente demandados.

1. Para el entendimiento del lector, se describió el funcionamiento de una pala P&H, y en profundidad, el sistema de ventilación asociado a los motores de propulsión, con sus componentes y etapas correspondientes.
2. Se expuso la problemática para demostrar que, en una minera ubicada en altura geográfica, la detención no programada de estos equipos, por condiciones climáticas adversas, es altamente perjudicial, ya que el proceso de producción se interrumpe por completo. Además, se expresa la necesidad de proponer la automatización, con argumentos sólidos en la gestión de activos con la Norma ISO 55.001 y 55.002, que promueven la maximización de los beneficios obtenidos de los motores de propulsión, a lo largo de su vida útil. Además, se fortaleció con base en la ingeniería de confiabilidad a través del modelo estadístico Weibull, que expresa la tasa de falla de los motores mencionados, y lo imperativo que resulta mantenerlos en óptimas condiciones, para que cumplan su ciclo de vida establecido.
3. Se hizo una descripción completa del sistema de automatización propuesto, con sus componentes asociados, en especial el equipo deshumidificador, encargado de brindar aire con bajos niveles de humedad a los motores de propulsión. Con esta automatización, los motores pueden ser ventilados con aire seco durante jornadas con precipitaciones, bajo condiciones controladas y con transiciones automáticas, permitiendo sacar máximo provecho de estos componentes, sin exponerlos a niveles de estrés que aceleren su desgaste.

4. Se realiza la simulación de escenarios con el método estadístico Monte Carlo, para comparar las diferentes condiciones entre uno y otro. El análisis y la evaluación realizada, han demostrado que la implementación del deshumidificador al sistema de ventilación original, contribuye significativamente en la disponibilidad de una pala, permitiendo que tenga un mayor tiempo de operación, sin representar un peligro para los usuarios ni para los técnicos encargados de atender el equipo. Al evitar detenciones que producen pérdidas con altos costos, se traducen en ahorros de proporciones elevadas, lo que brinda un aporte a la estabilidad y solidez financiera de una minera de manera considerable. Es decir, esta propuesta, ayuda a que una pala pueda tener un mejor rendimiento, sin exponer innecesariamente sus componentes, para sacar el máximo provecho de sí. La implementación del deshumidificador, representa una solución eficaz para reducir las detenciones no programada por eventos meteorológicos inestables. Así, se logró demostrar a través de una simulación, que no es necesario implementar ni materializar un proyecto, para evidenciar que una propuesta teórica puede tener resultados beneficiosos. Lo demuestra esta evaluación, que además de reducir las detenciones preventivas por precipitaciones, y costos asociados a estas, permite reducir la intervención humana en el equipo, mediante un sistema automatizado, capaz de trabajar en condiciones adversas con transiciones controladas 24 horas al día, 7 días a la semana, ofreciendo la continuidad operacional que la industria minera en Chile necesita, para seguir siendo una de los máximos exponentes a nivel global.

Una pala con un sistema deshumidificador implementado, es un equipo que ofrece una mayor disponibilidad y una productividad continua, generando un impacto financiero, con seguridad y estabilidad operacional.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, R. L. A., (2021). Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. Ingeniería en Higiene y Seguridad Ocupacional. Ventilación Industrial. 1 – 4, 136 – 140

Von Der Lieck, D., Joachim L. A. G., (2025) Trotec GmbH. Secador por Adsorción TTR 3700. 1 – 2. https://cl.trotec.com/shop/deshumidificador-por-adsorcion-ttr-3700-cl.html

© P&H Mining Equipment, Inc. (2011). Pala Eléctrica Minera, P&H 4100XPC (AC), Manual de Entrenamiento de Sistemas Mecánicos. 243-264

© P&H Mining Equipment, Inc. (2010). Pala Eléctrica Minera P&H 4100XPC. Manual de Sistema Eléctrica Centurion CA. 84, 115, 116, 143, 473, 474, 643

© P&H Mining Equipment, Inc. (2010). 4100XPC AC Pala Eléctrica. Manual del Operador de Centurion AC. 83, 125 - 133, 327 – 333, 355 – 362, 388 – 394.

Arata, A. A., Furlanetto, L., (2005). Manual de Gestión de Activos y Mantenimiento, 120 – 124.

Arata, A. A., Arata, B. A., (2013). Teoría y aplicación en proyectos de capital y en la operación de instalaciones industriales a través del enfoque R-MES, 156 – 162.

Norma Internacional ISO 55.000 (2014). Gestión de activos generales, principios y terminología. Vi, 5, 8 – 10. https://apcalidad.org/wp-content/uploads/2022/10/ISO-55000-2014-Gestion-de-Activos-Revision-APC-Solo-para-Capacitacion.pdf

Fonseca, D. N., Niño, S. C., Gutiérrez, M., (2009). Estudio del proceso de acondicionamiento de aire mediante sales disecantes en aplicaciones HVAC/R. 2 - 7. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84916714014

Sapag, C. N., Sapag, C. R., Sapag, P. J. M., (2014). Preparación y evaluación de proyectos. 305, 321. https://campusvirtual.icap.ac.cr/pluginfile.php/206834/mod_resource/content/2/Sapag%20N.%20et%20al%20%282014%29%20Preparaci%C3%B3n%20y%20Evaluaci%C3%B3n%20de%20Proyectos.%20Sexta%20Edici%C3%B3n.%2C%20pp.%2052-61.pdf

(CR) 2, (2016-2021). Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia. https://explorador.cr2.cl/