



UNIVERSIDAD  
PRIVADA  
DEL NORTE

# FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería de Minas

“IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS EN LA UTILIZACIÓN DE PALAS ELÉCTRICAS P&H PARA OPTIMIZAR LA PRODUCTIVIDAD DEL PROCESO DE CARGUÍO EN COMPAÑÍA MINERA ANTAMINA S.A., 2021”

Trabajo de suficiencia profesional para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autor:

Hilder Gofredo Cruz Alfaro

Asesor:

Ing. Danny Stephan Zelada Mosquera

Trujillo - Perú

2021



## **DEDICATORIA**

Este proyecto está dedicado a Dios, mi familia, mis profesores y mis compañeros de trabajo, por haber sido mi apoyo y soporte a lo largo de toda mi vida, que no sólo me han dado su cariño y me han acompañado, sino que también me han enseñado, aportando a mi formación como profesional y como ser humano.



## **AGRADECIMIENTO**

Quiero darle las gracias a Dios, quien con su amor y gracia ha estado conmigo todo el tiempo. A toda mi familia por estar siempre presentes, apoyarme y creer en mí.



## Tabla de contenidos

<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>2</b>
<b>AGRADECIMIENTO.....</b>	<b>3</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>6</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>7</b>
<b>RESUMEN EJECUTIVO .....</b>	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>9</b>
1.1. Antecedentes .....	9
1.2. Ubicación y acceso .....	11
1.3. Geología local .....	12
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>16</b>
2.1. Minería .....	16
2.2. Minería a tajo abierto .....	17
2.3. Palas eléctricas P&H.....	18
2.4. Disponibilidad mecánica .....	19
2.5. Productividad .....	19
2.6. Utilización de palas eléctricas P&H .....	19
2.7. Cables eléctricos mineros.....	20
2.8. Sistema Dispatch .....	21
2.9. Metodología Six sigma.....	22
<b>CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA .....</b>	<b>23</b>
3.1. Antecedentes .....	23
3.2. Identificación de la oportunidad de mejora .....	24
3.3. Metodología de análisis .....	25
3.4. Objetivos de la mejora .....	29
3.5. Métrica .....	30
3.6. Causas identificadas.....	32
3.7. Personas involucradas y roles .....	34
3.8. Planes de acción.....	35
3.9. Implementación.....	36
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS .....</b>	<b>38</b>
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>40</b>
5.1. Conclusiones.....	40
5.2. Recomendaciones .....	41
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>42</b>





## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1 Validación Financiera Six sigma .....</b>	<b>29</b>
<b>Tabla 2 Tabla Resumen y validación de causas.....</b>	<b>33</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Organigrama de Antamina. (Compañía Minera Antamina S.A., 2021) .....	10
Figura 2 Plano de Ubicación de Antamina. Fuente: (MINEM) .....	11
Figura 3 Antamina en Perú, es una mina a cielo abierto. (Antamina, 2019) .....	17
Figura 4 Pala eléctrica de cable: P&H 4100XPC AC-90 Fuente: (Komatsu, s.f.) .....	18
Figura 5 Gráfico de productividad de las Palas en CIA Minera Antamina. Fuente: Gerencia Mina	20
Figura 6 Cables eléctricos mineros. Fuente: (Geyer Kabel, 2020) .....	21
Figura 7 Fotografía de una pala eléctrica P&H Fuente: (Fernandez, 2020) .....	23
Figura 8 Gráfico de Horas de Paradas x Movimiento de Cable. Fuente: Elaboración propia .....	24
Figura 9 Diagrama del Proceso de Manipulación de Cables de Cola de Palas Eléctricas. Fuente: Elaboración propia. ....	28
Figura 10 Gráfico de tiempo de las horas totales de la demora de las palas eléctricas P&H por movimiento de cables. Fuente: Excelencia Operacional .....	30
Figura 11 Análisis de causa raíz representado en un diagrama de Ishikawa. Fuente: Elaboración propia.....	32
Figura 12 Cuadro de la condición de los frenos de Hoist de las distintas palas eléctricas P&H operativas. Fuente: Mantenimiento Mina .....	36
Figura 13 Cuadro de la condición de los frenos de Hoist de las distintas palas eléctricas P&H operativas tras haber realizados las acciones correctivas. Fuente: Mantenimiento Mina.....	37
Figura 14 Gráfico de barras del tiempo de las horas de demora por mover/agregar cables eléctricos en las palas eléctricas P&H. Fuente: Gerencia Mina.....	38
Figura 15 Gráfico de barras del tiempo de las horas de demora por mover/agregar cables eléctricos en las palas P&H 4100 durante el 2021. Fuente: Gerencia Mina.....	39
Figura 16 Campana de Gauss de Distribución de las demoras por mover/agregar cables. Fuente: Gerencia Mina .....	39



## **RESUMEN EJECUTIVO**

En la compañía minera Antamina S. A. en 2018 ocurrió un corte intempestivo de energía eléctrica en una pala P&H a causa de la manipulación del cable de energía ocasionando un movimiento brusco en el camión; como resultado de la investigación del evento se recomendó detener el proceso de carguío de la pala para cuando se tenga que manipular los cables de energía de las palas y perforadoras si se encontraran siendo alimentadas de la misma línea eléctrica.

Estas recomendaciones tuvieron un impacto en la utilización y productividad de las palas P&H incrementando las horas de detención del proceso por el movimiento de los cables eléctricos; al ver esta situación, encontré una oportunidad de mejora que buscaría reducir las horas de parada de las palas eléctricas P&H.

Utilizando análisis estadístico y la metodología Lean Six Sigma se pudo cuantificar la situación actual y proponer acciones para atacar la causa raíz que originó el evento y reducir las horas de parada sin sacrificar la seguridad de los operadores.

Tras implementar las acciones propuestas en el presente informe, se logró disminuir considerablemente las horas de parada de las palas obteniendo una mejor utilización y productividad horaria, en la cual se ve directamente convertido en más toneladas de mineral entregadas a la concentradora.

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.**

### **1.1. Antecedentes**

Compañía Minera Antamina S.A., es una empresa constituida en el Perú, regida por leyes peruanas, y cuyos accionistas son cuatro compañías líderes en la minería internacional (Compañía Minera Antamina S.A., 2021):

- Xstrata, con el 33.75%
- BHP Billiton Plc. con el 33.75%
- Teck – Cominco Limited, con el 22,5%
- Mitsubishi Corporation, con el 10%.

En la década del 50 del siglo pasado, el yacimiento de Antamina estuvo dentro de la cartera de exploración de la Cerro de Pasco Corporation, la que concluyó en un positivo estudio de factibilidad técnico-económico, pero la situación política del país de esa época hizo que su explotación se pospusiera indefinidamente. Con el gobierno militar de los años 70, la propiedad de Antamina revertió al Estado y estuvo en manos de Minero Perú durante más de 15 años, para luego proceder a su privatización en 1996.

Los inversionistas que ganaron la licitación formaron Compañía Minera Antamina S.A. Después de un proceso de dos años de exploraciones y tres años de construcción de su complejo minero inició sus operaciones de prueba el 28 de mayo del 2001, luego de concretarse la mayor inversión en la historia de la Minería Peruana. Poco más de cinco meses después de dar inicio a sus operaciones en prueba, Antamina comenzó su producción comercial el 1° de Octubre del 2001, produciendo concentrados de Cobre y Zinc, y otros subproductos.

Compañía Minera Antamina S.A. es la mayor inversión realizada en la historia de minería peruana (aproximadamente US\$ 2,260 millones) según el primer Reporte de Sostenibilidad

operaciones, Antamina se ha constituido en uno de los mayores productores nacionales de concentrados de Cobre y Zinc del país. El yacimiento Antamina cuenta también con otros minerales como el Molibdeno, la Plata, el Plomo y el Bismuto que son obtenidos de manera secundaria en el proceso de producción.

### 1.1.1. Organigrama

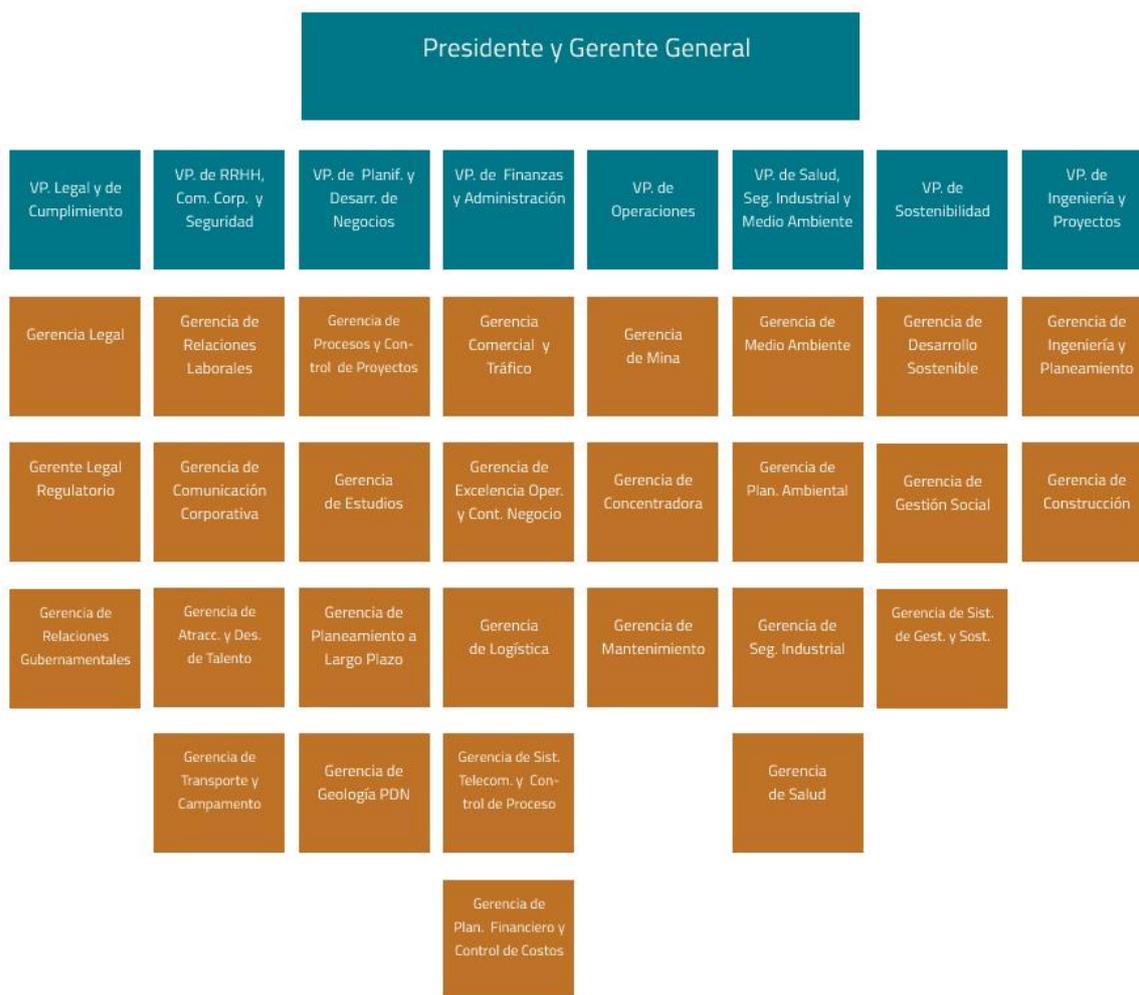


Figura 1 Organigrama de Antamina. (Compañía Minera Antamina S.A., 2021)

La mina se encuentra ubicada en el distrito de San Marcos, provincia de Huari, departamento de Ancash, a 270 kilómetros al norte de Lima en línea recta, en la cordillera oriental de los Andes, latitud 9°32'S, longitud 77°03'W y a una altitud entre los 4,100 a 4,700 msnm.

El acceso principal es Huaraz – Conococha – Antamina; toda esta ruta es a través de una vía asfaltada.

El acceso desde la ciudad capital es Lima – Pativilca – Conococha – Antamina; este recorrido es por vía asfaltada.

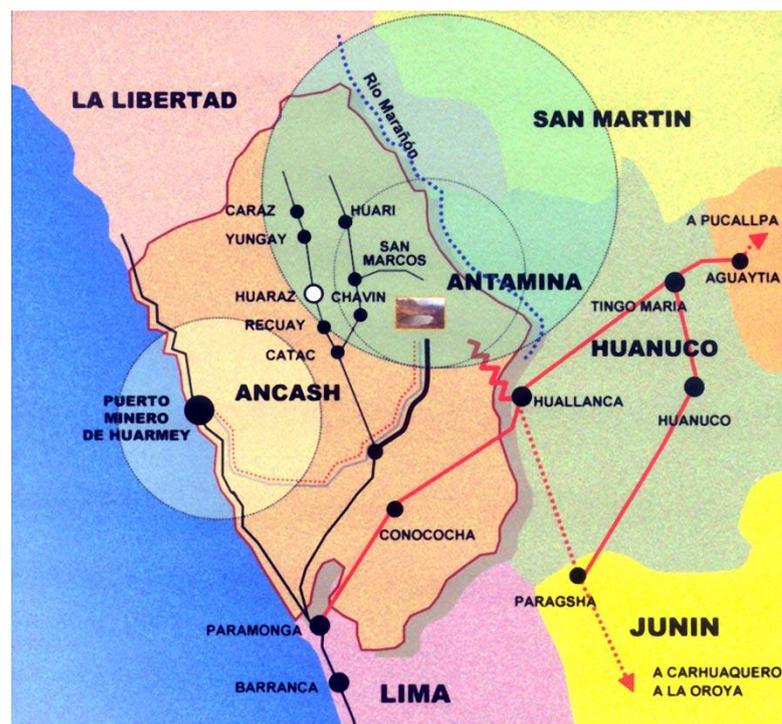


Figura 2 Plano de Ubicación de Antamina. Fuente: (MINEM)

### **1.3. Geología local**

#### **1.3.1. Geomorfología:**

El valle de Antamina es un valle glacial en U de 4 Km de largo con lados pronunciados y un lago remanente en la parte superior del valle.

La cabeza del valle de Antamina (noreste) es una cima puntiaguda con una altitud de 4,640 m a 4,717 m. Los picos llegan a 5,073 m (Cerro Tornillo) forman el lado noroeste del valle.

Las cumbres al lado sureste del valle varían de 4,683 m a 4,924 m (Cerro Buque Punta).

El valle de Antamina tiene una profundidad de 500 a 600 m por debajo de los márgenes y hasta 1,000 m por debajo del pico más alto. La topografía pre-glacial se interpreta haber sido una superficie puna alrededor de los 4,700 m con picos por encima de los 5,000 m. Hubo probablemente un pequeño y poco profundo río en Antamina formado como una cabecera durante las etapas de Valle y Cañón. El hielo acumulado en este valle durante la glaciación Pleistocénica la cual formó el valle principal y los valles colgantes.

El depósito de Antamina probablemente no estuvo expuesto antes de la primera glaciación. Se interpreta que la primera glaciación descubrió el depósito y expuso los sulfuros frescos. Esto se muestra por la presencia de sulfuros frescos en una matriz de carbonatos en la primera morrena. En el período interglacial hubo una etapa de oxidación de los sulfuros expuestos dando como resultado la formación de ferricretas. Esta zona de oxidación fue parcialmente removida por el segundo corredor glacial como se observa por la morrena limonítica de esta etapa.

### **1.3.2. Estratigrafía y Estructuras:**

El depósito de Antamina está dentro de una faja de sobreescurrecimientos y el aspecto estructural es el principal control en la intrusión y alteración de skarn. La historia estructural interpretada del depósito se describe como sigue:

Una falla longitudinal NE-SW es la estructura más antigua. Esta controló parte de la intrusión y el valle de Antamina. Hay una exposición de esta falla en la cabecera del valle por debajo de un sobreescurrecimiento posterior.

Una secuencia de sobreescurrecimientos NE se desarrollaron durante el Eoceno Tardío, fase II Incaica. El depósito de Antamina se ubica dentro de una lengua de sobreescurrecimientos formada por lo menos seis planos de sobreescurrecimiento. Esta lengua tiene 3 Km. de ancho y 3 Km. de largo. Esta secuencia de sobreescurrecimientos es una pila imbricada que ha resultado en un sobre-engrosamiento de las rocas huéspedes favorables en el área (Jumasha).

Una extensión muy localizada ocurrió en el lado SE del valle actual de Antamina. La extensión fue acomodada por fallamientos lístricos y por movimiento de falla con salto en dirección del rumbo a lo largo de la falla principal longitudinal NE-SW. Esta fase extensional menor se puede correlacionar regionalmente con la fase Quechua 2. Se interpreta que las intrusiones de Antamina han sido controladas por fallamientos lístricos ya que se les nota ocupando planos de falla en la caliza por encima del depósito. Dentro del depósito no hay señales obvias de que estas fallas existieron ya que su ubicación está ahora completamente obliterada por la intrusión y el skarn.

### **1.3.3. Tipo de Depósito:**

El depósito de Antamina es un skarn de cobre muy desarrollado conteniendo zinc, plata, molibdeno, plomo y bismuto formado por la intrusión del cuerpo de cuarzo monzonita en las calizas. Las características de una zona de skarn dependen de la naturaleza de la roca intruída y las emanaciones activadas por el cuerpo intrusivo. Se reconocen dos tipos de alteración: recristalización o reacomodo de los constituyentes presentes en las rocas y adición de materiales. La mayoría de los depósitos de skarn muestran ambos aspectos. Los skarn más evidentes se desarrollan cuando la roca encajonante es una roca sedimentaria de composición carbonatada. La depositación de minerales en los depósitos de skarn típicamente muestra controles estructurales y estratigráficos. La litología del skarn generalmente es zoneada a partir del centro hacia los bordes.

El depósito de Antamina muestra características tanto de un skarn de cobre como de zinc. Los skarns de cobre normalmente se forman en asociación proximal con el intrusivo que es la fuente de los metales, mientras que los skarns de zinc generalmente se forman distales a la fuente de fluídos. Los estudiosos del depósito de Antamina creen que los fluídos mineralizantes se originaron en una fuente distal más profunda y por lo tanto no estuvieron en equilibrio con el intrusivo presente en el valle actual. Esto resultó en una reacción de los fluídos tanto en los intrusivos como en las calizas formando las unidades endoskarn y exoskarn. Se cree que los intrusivos previamente emplazados causaron un evento de metamorfismo termal formando los hornfels que rodean el depósito con wollastonita asociada y colapso en el volumen. Estas unidades luego actuaron como trampas para sucesivos eventos mineralizantes que forzaron a los fluídos a reaccionar con los intrusivos formando el endoskarn y limitaron la reacción hacia la roca circundante formando los exoskarns.

#### **1.3.4. Mineralización:**

El yacimiento de Antamina ha probado ser consistentemente bien mineralizado y marcadamente predecible en términos de ley y zonamiento metálico. Muy poco de la litología de skarn en Antamina está sin mineralización.

El zonamiento metálico es muy distintivo dentro del depósito (Ver anexo N° 02). El cobre ocurre homogéneamente distribuido a partir del endoskarn hasta el contacto con la caliza. El zinc y bismuto tienden a ocurrir dentro de los 70m del contacto entre el skarn de granate verde con la caliza/mármol/hornfels. La molibdenita está generalmente localizada dentro del núcleo intrusivo y el endoskarn circundante. La plata está presente en todas las litologías del exoskarn. El plomo está generalmente ubicado en el exoskarn de granate verde y el hornfels. El cobalto está generalmente asociado a la mineralización de esfalerita. Sin embargo, se pueden encontrar venillas y manchas de cualquier mineral como ocurrencias raras en cualquier tipo de roca en Antamina.

El mineral de sulfuro predominante de cobre es la calcopirita.

Aproximadamente ocho por ciento de la mineralización de cobre se encuentra en la forma del mineral bornita. El zinc ocurre en la forma de esfalerita (Ver anexo N° 03). La plata normalmente está asociada con calcopirita. Sin embargo, también ocurre asociada con galena, sulfosales de bismuto y tenantita. La molibdenita es el sulfuro fuente de molibdeno. Los minerales de bismuto más comunes son: bismutinita, cosalita, wittichenita, cuprobismutita, aikinita, kobelita y otros varios minerales de Bi están presentes.

## **CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Minería**

La Minería es una actividad económica del sector primario representada por la explotación o extracción de los minerales que se han acumulado en el suelo y subsuelo en forma de yacimientos. Existe una gran variedad de minerales a explotar, se tiene a los minerales metálicos, tales como hierro, cobre, plomo, oro, plata, cromo, mercurio, aluminio, entre otros, los cuales son empleados hoy en día como materias primas básicas para la fabricación de toda clase de productos industriales. Los minerales no metálicos como el granito, mármol, arena, arcilla, sal, mica, cuarzo, esmeralda, zafiro, etc., son usados como materiales de construcción y materia prima de joyería entre otros usos. Y los de mayor significación en la actualidad son los minerales energéticos o combustibles, empleados principalmente para generar energía: tenemos al petróleo, gas natural y carbón o hulla.

La minería siempre ha constituido en ser uno de los indicadores básicos de las posibilidades de desarrollo económico de un país ya que a los minerales descubiertos se les da un valor económico sobresaliente debido a la utilidad que prestan a la humanidad.

Existen dos métodos de explotación:

La minería a tajo abierto y la minería subterránea, siendo la primera la más común hoy en día.

## 2.2. Minería a tajo abierto



*Figura 3 Antamina en Perú, es una mina a cielo abierto. (Antamina, 2019)*

Son aquellas explotaciones mineras que tienen lugar en la superficie, esto es posible cuando el yacimiento brota en superficie o a poca profundidad. Empezó a realizarse a mediados del siglo XVI y se utiliza en todo el mundo.

Para que una mina a tajo abierto pueda ser llevada a cabo, es precisa la excavación (mediante maquinaria o explosivos) de los terrenos que rodean al yacimiento. Aquel material que no sea aprovechable en la explotación es denominado estéril y se deposita en escombreras situadas fuera del recinto de la mina, que se utilizará en el futuro para restaurarla una vez se agote.

Los costos de trabajo son menores, tanto en excavación como en transporte, y permiten utilizar maquinaria grande. No precisa de iluminación artificial y permite el uso de explosivos de cualquier tipo, sin olvidar que la seguridad y la higiene de los trabajadores es mucho mejor.

### **2.3. Palas eléctricas P&H**

Las palas eléctricas son utilizadas en la minería a tajo abierto como equipos de carguío. Y pertenecen al grupo de equipos estáticos: que son los que poseen como medio de tracción orugas y que por consiguiente permanecen largos periodos de tiempo en un mismo sitio.

Las palas eléctricas P&H pertenecen a la línea de equipos para minería superficial P&H (Pawling & Harnischfeger) (KOMATSU) que a su vez son parte de Joy Global, compañía que fue adquirida en 2017 por Komatsu. Éstas están diseñadas y construidas para ayudar a las minas a mover más material a un menor costo por tonelada. Tienen un enfoque modular en el diseño de componentes que se traduce en la posibilidad de realizar actualizaciones y mantenimiento de manera más eficiente.



*Figura 4 Pala eléctrica de cable: P&H 4100XPC AC-90 Fuente: (Komatsu, s.f.)*

#### **2.4. Disponibilidad mecánica**

Según Ana Alberti de ALS Global (Alberti, 2020) la disponibilidad de una máquina es una métrica que evalúa el rendimiento de los elementos que realizan una función determinada, en un momento determinado, durante un período determinado, en función de los criterios de confiabilidad, mantenibilidad y soporte para el mantenimiento de los equipos.

La misión de calcular la disponibilidad de los equipos que son utilizados en la operación minera es esencial para elegir y seguir las estrategias de mantenimiento adecuadas para cada equipo.

Por lo tanto, es posible definir listas de prioridad, atención e historial de las máquinas, también rastreando su disponibilidad y confiabilidad y siempre buscando aumentar el índice de disponibilidad. Esta acción también aumenta la productividad y, si está bien implementada, reduce los costos de mantenimiento.

#### **2.5. Productividad**

Cuando hablamos de productividad nos referimos al tonelaje cargado con respecto al tiempo que el equipo está en producción.

#### **2.6. Utilización de palas eléctricas P&H**

Es el porcentaje de tiempo que mide, que tanto está en producción la pala eléctrica P&H del tiempo que está disponible.

Podemos ver un ejemplo de cómo se calcula la utilización de un equipo, pala eléctrica en este caso, en la Figura 5 (siguiente página).

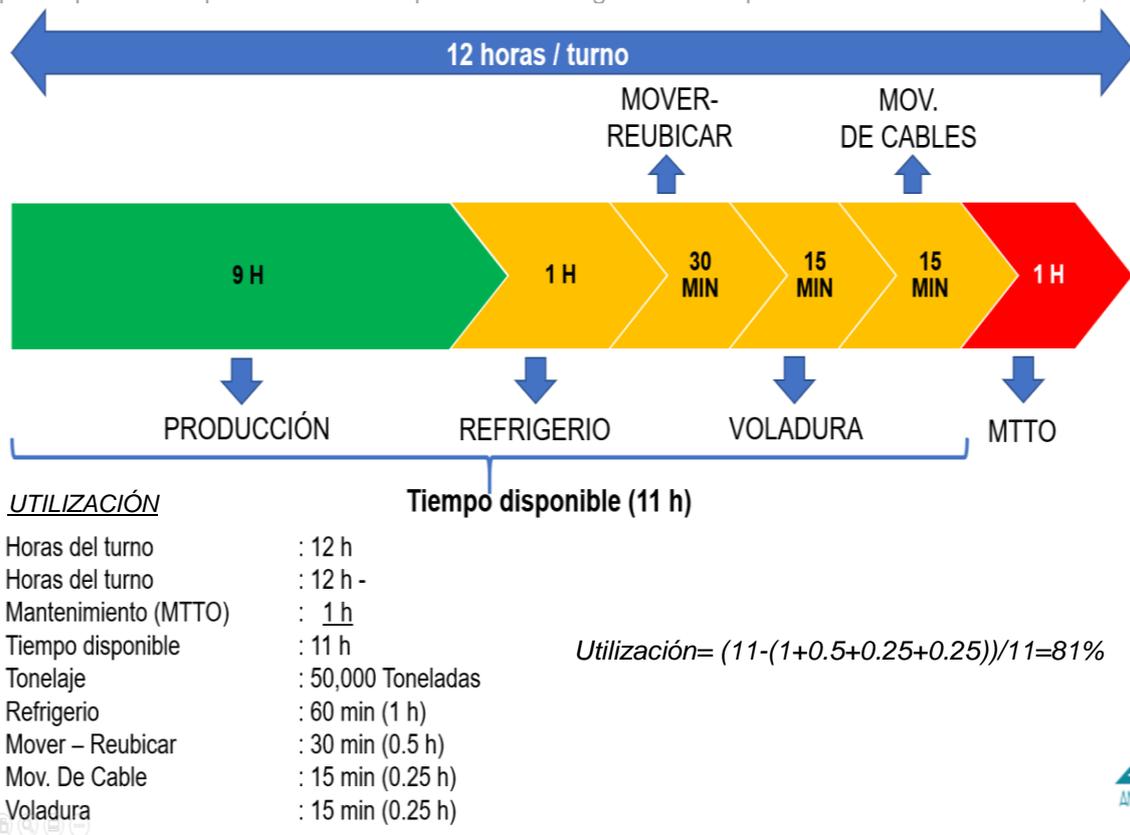


Figura 5 Gráfico de productividad de las Palas en CIA Minera Antamina. Fuente: Gerencia Mina

## 2.7. Cables eléctricos mineros

Los Cables para Minería son de un uso especial y cubren varios usos como control y potencia, para baja y media tensión, diseñados para ambientes agresivos y de mucho abuso mecánico. Los cables para minería son resistentes generalmente a la exposición al sol, agua, temperatura, fricción, aplastamiento, etc.

Entendemos por cable minero al cable utilizado en condiciones particulares como:

- Áreas contaminadas por ácidos.
- Uso rudo.
- En algunos casos sumergibles.
- Expuesto a radiación UV.
- Gran tensión (mecánica).

móviles (palas, perforadoras, etc).



*Figura 6 Cables eléctricos mineros. Fuente: (Geyer Kabel, 2020)*

## **2.8. Sistema Dispatch**

Introducido hace 40 años como la primera herramienta de despacho computarizado de la minería por la empresa Modular Mining, el sistema de gestión de flota DISPATCH ha revolucionado la forma en que las minas trabajan en tiempo real. Hoy en día, es el FMS (Fleet Management System, en español: Sistema de Manejo de Flota) más fiable en la industria minera.

El sistema aprovecha tres modelos de programación matemática (Programación lineal (LP), Programación dinámica (DP) y Mejor ruta (BP)) para maximizar la productividad general de su camión al mantener y actualizar un modelo en tiempo real del equipo de la mina, las ubicaciones y los caminos de transporte de la mina. El sistema calcula continuamente las asignaciones optimizadas de los camiones y las envía automáticamente a los operadores de camiones.

## 2.9. Metodología Six sigma

Seis sigma ( $6\sigma$ ) o Six Sigma, más conocida por su denominación en inglés, es una estrategia de mejora de procesos, centrada en la reducción de la variabilidad de los mismos, reforzando y optimizando cada parte de proceso consiguiendo reducir o eliminar los defectos o fallos en la entrega de un producto o servicio al cliente. La meta de seis sigma es llegar a un máximo de 3,4 defectos por millón de eventos u oportunidades (DPMO), entendiéndose como defecto cualquier evento en el que un producto o servicio no logra cumplir los requisitos del cliente.

Dentro de los beneficios que se obtienen del seis sigma están: mejora de la rentabilidad y la productividad. Una diferencia importante con relación a otras metodologías es la orientación al cliente.

### 2.9.1. Principios de seis sigma

- Liderazgo comprometido de arriba hacia abajo.
- Estructura directiva que incluye personal a tiempo completo.
- Formación/entrenamiento.
- Acreditación orientada al cliente y enfocada a los procesos.
- Dirigida con datos.
- Metodología robusta.
- Los proyectos generan ahorros o aumento en ventas.
- El trabajo se reconoce.
- Proyectos largos.
- Comunicación.

### **CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA**

Ingresé a la Compañía Minera Antamina en mayo de 1999 en las funciones de operador de equipos hasta el 2001, posteriormente fui supervisor Dispatch (sistema de administración de flota de mina) hasta el 2003, luego supervisor de producción hasta el 2009 y a partir de ese año fui nombrado supervisor Senior de Producción Mina, cargo que desempeño hasta la actualidad.

#### **3.1. Antecedentes**

En el año 2018 ocurrió un corte intempestivo de energía eléctrica en la pala SH005 debido a la manipulación de los cables de la línea de alimentación, ocasionando el desplazamiento vertical del balde de la pala sobre la tolva del camión minero Komatsu 930E, que a su vez causó un movimiento brusco al camión.

Las palas eléctricas P&H tienen un sistema de frenado de discos que, ante un corte intempestivo de la energía eléctrica, estos se accionan automáticamente absorbiendo toda la energía cinética involucrada y eliminan el movimiento. Este sistema no funcionó en esta ocasión.



*Figura 7 Fotografía de una pala eléctrica P&H Fuente: (Fernandez, 2020)*

Como resultado de la investigación del evento, se recomendó detener el proceso de carguío de la pala para cuando se tenga que manipular los cables de la línea de alimentación de energía de las palas y perforadoras, si estas se encontraban con alimentación de energía compartida (Split).

Esta detención del proceso de carguío es registrada en el sistema Dispatch como demora por movimiento de cables.

### 3.2. Identificación de la oportunidad de mejora

Durante el 2019, el tiempo de demora de las palas eléctricas P&H por movimiento de cables fue de 94.3 horas/mes. Este incremento de horas tiene un impacto significativo en la utilización y productividad horaria de las palas. En la figura 8 muestra la evolución del incremento de horas de parada de la pala por movimiento de cables.

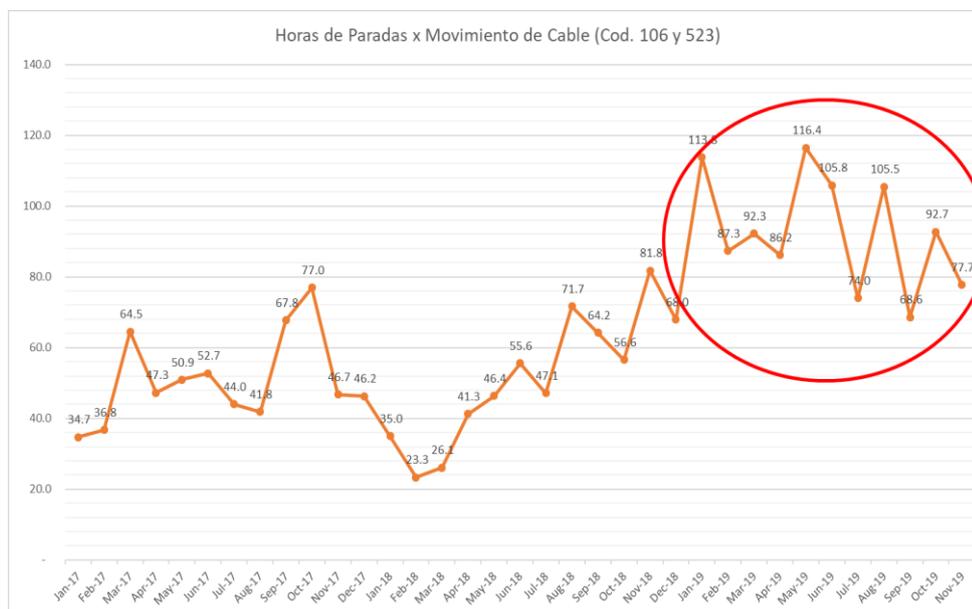


Figura 8 Gráfico de Horas de Paradas x Movimiento de Cable. Fuente: Elaboración propia

### **3.3. Metodología de análisis**

En el presente proyecto se utilizará la herramienta de mejora Six Sigma, un sistema que busca mejorar procesos dentro de una organización. Se plantea la aplicación de la mejora utilizando la metodología Six Sigma (DMAIC) analizando las distintas variables que influyen en las demoras que impactan la utilización de las palas eléctricas P&H.

Aparte de esta herramienta de solución de problemas nos ayudamos con distintas herramientas de descripción y análisis de procesos como diagramas de flujo o diagrama de Ishikawa (espina de pescado).

Al ver la complejidad de las causas que originan las demoras que impactan la utilización de palas eléctricas P&H se recurrirá a la metodología Six Sigma que nos permitirá identificar los problemas más frecuentes de las palas eléctricas P&H y así poder realizar una mejor gestión de éstas.

#### **3.3.1. DMAIC**

DMAIC es un proceso de mejora, sistemático, científico y basado en hechos. Este proceso cerrado elimina pasos improductivos, con frecuencia se enfoca en mediciones nuevas y aplica tecnologías de mejoramiento.

##### **3.3.1.1. Definir**

Consiste en concretar el objetivo del problema o defecto y validarlo, a la vez que se definen los participantes del programa.

Procesos:

- Definir el caso y elaborar el borrador de la declaración del problema.
- Seleccionar a los líderes del equipo.
- Movilizar al equipo.



### **3.3.1.2. Medir**

Consiste en entender el funcionamiento actual del problema o defecto.

Procesos:

- Establecer y validar objetivos.
- Determinar las métricas.
- Alinear al equipo con el problema y los objetivos.
- Chequear con los interesados.
- Identificar las causas clave del mapa de procesos.

### **3.3.1.3. Analizar**

Pretende averiguar las causas reales del problema o defecto.

Procesos:

- Mostrar gráficamente la data.
- Recolectar datos sobre las causas.
- Identificar posibles causas raíz.
- Validar las causas raíz.
- Chequear con los interesados.
- Generar posibles soluciones.
- Evaluar el impacto, riesgos y alternativas.

Permite determinar las mejoras procurando minimizar la inversión a realizar.

Procesos:

- Desarrollar planes de implementación.
- Chequear con los interesados.
- Comenzar a implementar la solución
- Desarrollar el sistema de control del proceso.

#### **3.3.1.5. Controlar**

Se basa en tomar medidas con el fin de garantizar la continuidad de la mejora y valorarla en términos económicos y de satisfacción del cliente.

Procesos:

- Documentar y compartir aprendizajes y oportunidades.
- Monitorear la implementación y el sistema de control del proceso.
- Ratificar resultados.

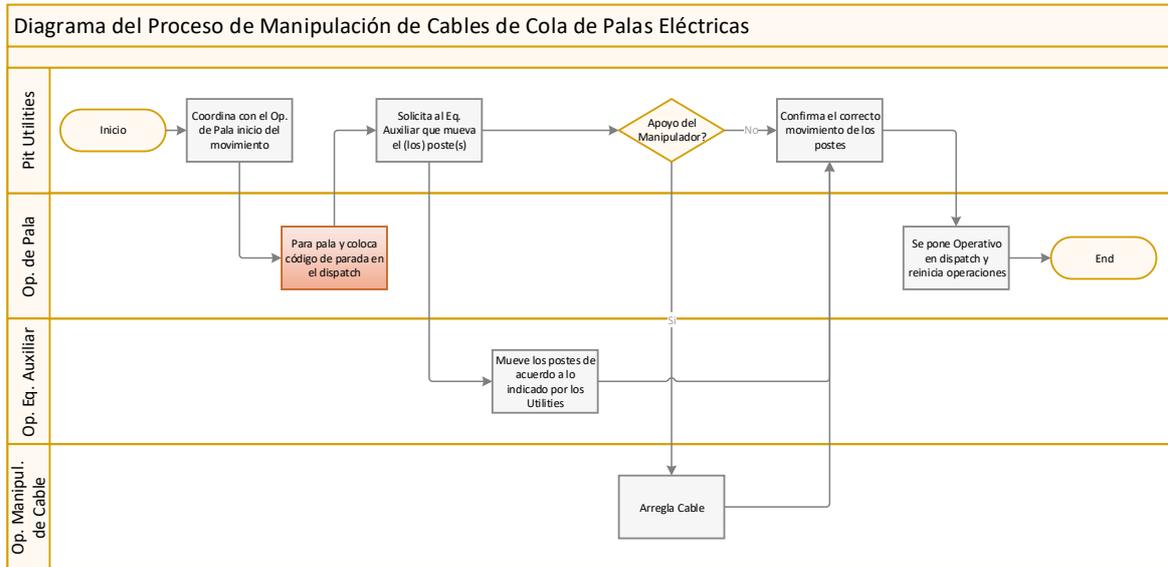


Figura 9 Diagrama del Proceso de Manipulación de Cables de Cola de Palas Eléctricas. Fuente: Elaboración propia.



### 3.4. Objetivos de la mejora

- Disminuir las horas de parada de palas eléctricas por manipulación de cables de 94.3 a 45.9 horas al mes que representa el 20.5% más de mineral movido a la concentradora. (ver tabla 1)
- Disminuir las horas de parada de palas eléctricas por manipulación de cables sin afectar la seguridad de los operadores.
- Elaborar un Plan de Mejora utilizando la metodología Lean Six Sigma.
- Incorporar el Plan de Mejora a los Planes de Corto Plazo ya establecidos por el Área de Planeamiento.
- Optimizar el proceso de carguío de las palas eléctricas.
- Procesar y analizar datos provistos por el sistema de administración de flota (Dispatch) buscando la optimización de la utilización de los equipos de carguío y acarreo.

*Tabla 1 Validación Financiera Six sigma*

Proyecto: Disminución de horas de paradas de palas eléctricas por manipulación de cables

<b>Variación KPIs</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Tiempo de Paradas por Mover/Agregar Cable Palas Eléctricas - Línea Base	94.3	h/mes
Tiempo de Paradas por Mover/Agregar Cable Palas Eléctricas - Objetivo	45.9	h/mes
Tiempo Adicional a la Operación	48.4	h/mes
Horas adicionales de operación al año	580.8	h/mes

<b>Precios y Drivers</b>		
Producción horario de Palas P&H (carguío por un solo lado: 50% de productividad)	2444	t/h
Material Adicional Movido	1419519	t/año
Proporción de Mineral Movido a Concentradora (5YP)	20.50%	%
<b>ESTIMACIÓN BENEFICIO ECONÓMICO ANUAL</b>	<b>14653519</b>	<b>US\$/año</b>

### 3.5. Métrica

La métrica es uno de los indicadores que se usa para medir el éxito del proyecto. Ésta es consistente con el problema y el objetivo.

Debe ser representada en un gráfico de serie de tiempo que contenga las siguientes líneas:

- Desempeño de Línea Base.
- Desempeño Actual.
- Meta de desempeño del proyecto.

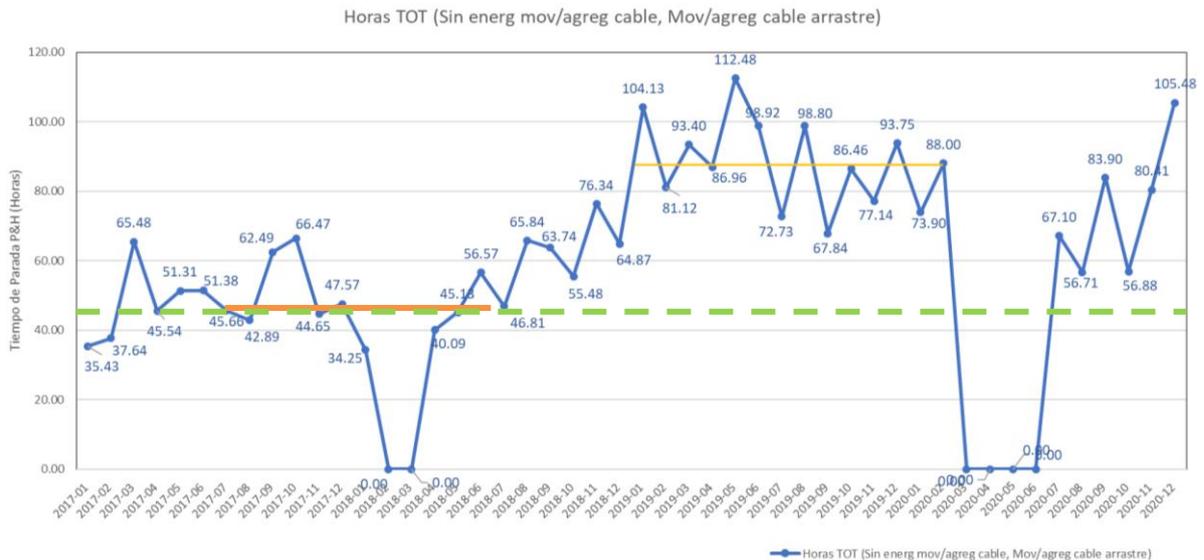


Figura 10 Gráfico de tiempo de las horas totales de la demora de las palas eléctricas P&H por movimiento de cables. Fuente: Excelencia Operacional

- 49.45 - Línea Base antes del evento (julio 2017 – julio 2018)
- 94.30 - Línea Base del evento (enero 2019 – febrero 2020)
- - - 45.90 – Línea Objetivo

Como se menciona en los antecedentes, hasta 2018 no se tuvieron eventos de seguridad relacionados al movimiento de cables eléctricos de las palas P&H. Tras este evento se implementó la parada de las palas cada vez que se tuviera que manipular cables eléctricos generando un aumento en el tiempo de paradas para mover/agregar cables eléctricos.

Por estas razones encontramos 2 líneas bases en la Figura 13 (arriba), una perteneciente a un periodo antes del evento y una después de haberse implementado las paradas de palas, siendo la demora en ésta última la que se busca reducir.

### 3.6. Causas identificadas

#### 3.6.1. Causa primaria del evento.

- Falla del freno de levante de la pala eléctrica P&H SH005.

#### 3.6.2. Causas Secundarias

En el trabajo normal de carguío de palas eléctricas estas experimentan paradas intempestivas por cortes de energía atribuidas a fallas en los equipos (pala, perforadoras) que se deben a:

- Cortes de energía por manipulación de cables.
- Falla de la subestación eléctrica.
- Corte de energía por accidentes por caída de rocas.
- Corte de energía por accidentes de errores operacionales.
- Corte por tormentas eléctricas etc.

#### 3.6.3. Análisis de causa raíz

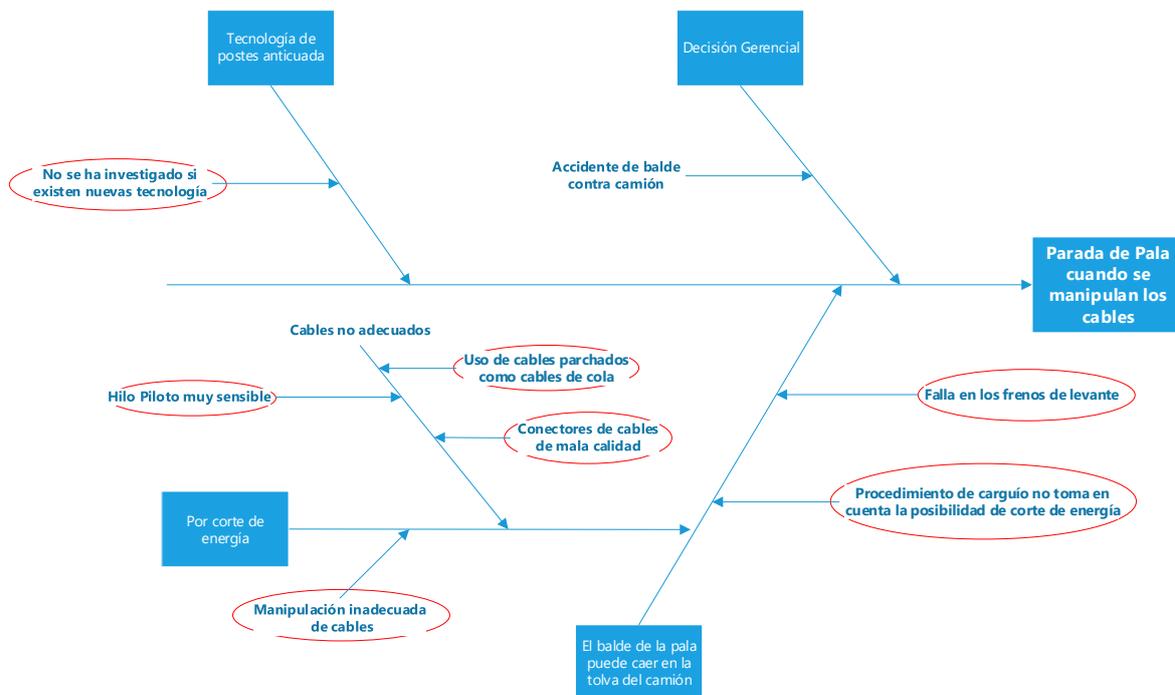


Figura 11 Análisis de causa raíz representado en un diagrama de Ishikawa. Fuente: Elaboración propia

### 3.6.4. Resumen y validación de causas

*Tabla 2 Tabla Resumen y validación de causas*

Desperdicio	Causa Raíz	Validar (datos)	Impacto	Ideas para mejoramiento
	Falla de frenos en levante	Se realizó pruebas de frenado en todas las palas P&H, en la pala 05 no funcionaron los frenos de emergencia.	En un corte de energía el balde de la pala puede golpear la tolva del camión.	Seguir las recomendaciones realizadas por Joy Global.
	Procedimiento de carguío no toma en cuenta posibilidad de corte de energía.	El procedimiento actual (PETS014) no especifica cambios en la operación de la pala cuando se está manipulando los cables eléctricos.	El desplazamiento estándar del balde en una parada de emergencia es hasta 1.5 m, este podría, aún en condiciones normales, golpear la tolva del camión si lo está cargando.	Consultar a Entrenamiento Mina si es necesario realizar algún ajuste al procedimiento durante a manipulación de cables.
Parada de pala cuando se manipulan cables eléctricos	Manipulación inadecuada de cables	De enero a mayo 2019 se produjeron 32 daños de cables eléctricos durante su manipulación.	Cortes de energía y daños a los cables.	Tercerizar con personal experto la manipulación de cables Re-entrenar a los pit utilities en la manipulación de cables. Probar cables más robustos.
	Hilo piloto muy sensible	Durante el 2018 hubo 105 daños a cables eléctricos relacionados al hilo piloto.	Cortes de energía y daños a los cables.	Solicitar alternativas de cables a Electricidad Mina.
	Conector de cable pala de mala calidad	Existen conectores de cable de fabricación local que son de inferior calidad y representan el aprox. 70% del Stock.	Cortes de energía y daños a los cables.	No usar los conectores alternativos.
	Uso de cables parchados como cables de cola	No hay distinción al momento de asignar un cable.	Cortes de energía y daños a los cables.	Solo usar cables nuevos como cables de cola.
	No se ha investigado si existen otras tecnologías	Desde el inicio de la operación el armado de puentes para el paso de cables prácticamente no ha cambiado.	Tiempos más largos de manipulación y restricción de producción.	Investigar si existe nuevas tecnologías de tendidos de puentes que disminuyan el tiempo de manipuleo.

Observaciones:

**Joy Global:** Es una compañía que manufactura y da servicios a maquinaria pesada que es usada en la extracción minera. Fue adquirida por Komatsu y tiene a la línea de palas eléctricas P&H.

**Pit Utilities:** Es el personal encargado de realizar los movimientos e incremento de cables eléctricos a las palas y perforadoras.

### **3.7. Personas involucradas y roles**

Tras haber identificado la oportunidad de mejora; el análisis, formulación e implementación del proyecto necesita contar con un equipo multidisciplinario para alcanzar los objetivos trazados. Además, el proyecto se apoya y compromete desde los niveles más altos de la dirección y la organización como recomienda la estrategia Six Sigma. (Guerrero, 2019)

#### **3.7.1. Líderes del proyecto**

##### **Supervisor Senior de operaciones mina:** (mi persona)

- Identifica la oportunidad de mejora, analiza base de datos, establece la línea base y propone las acciones para alcanzar el objetivo

##### **Superintendente de mina:** (dueño del proceso)

- Asigna los recursos para el proyecto
- Participación en las reuniones del equipo.
- Comunica los resultados
- Refuerza el progreso del proyecto.
- Se responsabiliza por los resultados

##### **Gerente de mina:** (líder del proyecto)

- Define el alcance
- Aprueba las soluciones
- Responsable de los resultados

#### **3.7.2. Interesados**

##### **Gerencia de Mina**

Al reducir el tiempo de parada de las palas eléctricas P&H incrementamos la utilización y la productividad horaria para el cumplimiento de los planes de producción ex pit.

## **Mantenimiento Mina**

Al establecer un programa de inspección preventiva de los frenos de Hoist de las palas, el área de Mantenimiento Mina podrá identificar posibles desgastes prematuros del sistema de frenos de levante para hacer las reparaciones oportunas.

### **3.8. Planes de acción**

Tras haber definido el problema, medido y analizado los datos y causas se propone las siguientes acciones:

#### **3.8.1. Plan de acción**

1. Verificar la factibilidad de retorno a la continuidad de la operación de las palas durante la manipulación de cables.
2. Definir nuevos requerimientos del mantenimiento y seguridad del sistema de freno de baldes de las palas P&H.
3. Realizar una evaluación del mecanismo de freno de Hoist de las palas P&H.
4. Revisar estatus de las condiciones de los frenos de balde de las palas y definir un plan de mantenimiento preventivo.
5. Subsanan cualquier desviación en el estado del sistema de frenos de balde de las palas P&H.
6. Revisar y aprobar la nueva propuesta de protocolos de mantenimientos de seguridad con equipo de riesgo.
7. Realizar pruebas de campo del sistema de freno de Hoist para validar el nuevo protocolo de operaciones de palas P&H.
8. Formalizar un nuevo protocolo de mantenimiento de frenos de balde para palas P&H.
9. Formalizar nuevo protocolo de Operación de palas P&H durante movimiento de cables eléctricos.

10. Difusión del nuevo estándar de operación de palas P&H a las guardias de operación.

11. Puesta en marcha del protocolo de operación de palas durante el movimiento de cables.

### 3.9. Implementación

Este proyecto se viene implementado desde enero del presente año (2021) en la CIA Minera Antamina, tras haber pasado las fases de definición del problema, recolección de información y tomando como guía el plan de acción ya elaborado.

Los nuevos protocolos y actividades preventivas fueron informadas al Área de Mantenimiento quienes son los encargados de realizar el programa de inspección del estado de los frenos de Hoist durante las paradas de las palas eléctricas P&H (punto 7 del plan de acción), indicando la condición real en la que se encuentran los frenos de levante.

Los resultados se observan en el siguiente cuadro:

Modelo	Pala	Serie	Fecha de Inspección	Freno de Hoist	#Lainas	Medición de Desgaste	Caída de Balde	Comentarios	RHM (03/Nov/2020) Tiempo de aplicación - Últimas 2 semanas
4100XPC-DC	SH005	ES41207	11/3/2020	Delantero	2	0.390"	0 m	Regular ambos frenos en el próximo PM (500 horas) ya que se encuentran cerca al límite de desgaste. Aún cuentan con 2 lainas. Es necesario llevar una tendencia de desgaste (registro cada 500 horas).	
				Posterior	2	0.386"			
	SH006	ES41215	11/12/2020	Delantero	2	0.350"	0.3	Se reguló freno delantero. Es necesario llevar una tendencia de desgaste (registro cada 500 horas).	
				Posterior	1	0.280"			
	SH007	ES41239	11/18/2020	Delantero	1	0.440"	1.5m	Regular inmediatamente ambos frenos de Hoist, por presentar recorrido de ambos pistones fuera de tolerancia. Es necesario llevar una tendencia de desgaste (registro cada 500 horas).	
				Posterior	2	0.440"			
4100XPC-AC	SH008	ES41273	11/7/2020	Delantero	1	0.426"	1 m	Regular inmediatamente ambos frenos de Hoist, por presentar recorrido de ambos pistones fuera de tolerancia. Es necesario llevar una tendencia de desgaste (registro cada 500 horas).	
				Posterior	3	0.437"			
	SH009	ES41279	12/6/2020	Delantero	2	0.186"	0.5m	Llevar una tendencia de desgaste (registro cada 500 horas). Seguimiento al tiempo de aplicación de frenos, ligeramente sobre límite recomendado. Mantener en observación freno delantero (otro proveedor).	
				Posterior	2	0.293"			
	SH010	ES41288	11/4/2020	Delantero	2	0.430"	1 m	Regular inmediatamente ambos frenos de Hoist, por presentar recorrido de ambos pistones fuera de tolerancia. Aun cuentan con 2 lainas. Es necesario llevar una tendencia de desgaste (registro cada 500 horas).	
Posterior				2	0.420"				
SH011	ES41289	11/1/2020	Delantero	4	0.360"	0.3 m	Regular freno de Hoist posterior en el próximo PM (500 horas), por presentar recorrido de pistón fuera de tolerancia. Aun cuenta con 2 lainas. Es necesario llevar una tendencia de desgaste (registro cada 500 horas).		

Figura 12 Cuadro de la condición de los frenos de Hoist de las distintas palas eléctricas P&H operativas.  
Fuente: Mantenimiento Mina

las palas SH005, SH006, SH009 y SH011 están aptas para movimiento de cables desde la fecha de la evaluación, mientras que las palas SH007, SH008 y SH010 están al límite de operación y requieren atención mecánica.

Luego de realizar las acciones correctivas en las palas indicadas, se obtuvo el siguiente cuadro:

Modelo	Pala	Serie	Fecha de Inspección	Freno de Levante	#Lainas	Medición de Desgaste	Comentarios	Acción futura	Backlog OT	Fecha Estimada
4100XPC-DC	SH005	ES41207	11/21/2020	Delantero	1	0.250"	El 11/21/20, se retira una lana de cada freno			
				Posterior	1	0.251"				
	SH006	ES41215	11/12/2020	Delantero	2	0.350"	Realizar medición para obtención de tendencia de desgaste			
				Posterior	1	0.280"				
	SH007	ES41239	12/5/2020	Delantero	0	0.307"	El 11/20/2020, se retira una lana solo en el posterior, el día 12/05/2020 se retira una lana delantera, quedando dentro la medida	Cambio de los dos frenos	MM659108 MM670659	12/24/2020
				Posterior	1	0.308"				
4100XPC-AC	SH008	ES41273	12/5/2020	Delantero	0	0.160"	El 11/16/2020 Se retira una lana a cada freno, el 12/05/20 se realiza la verificación de medida	Cambio de los dos frenos	MM670658 MM659303	12/21/2020
				Posterior	2	0.293"				
	SH009	ES41279	12/6/2020	Delantero	2	0.293"	El 12/06/20 se realizó las pruebas dinámicas y el 12/04/20 se evaluó todo el sistema de frenos durante el mantenimiento			
				Posterior	2	0.186"				
	SH010	ES41288	11/27/2020	Delantero	1	0.175"	El 11/27/2020 se retira un alina en cada freno			
				Posterior	1	0.185"				
	SH011	ES41289	12/6/2020	Delantero	3	0.234"	En la prueba Dinámica se desplazo 0.3 m el 12/06/20 se retira una lana a cada freno, quedando dentro le las medida			
				Posterior	1	0.248"				

Figura 13 Cuadro de la condición de los frenos de Hoist de las distintas palas eléctricas P&H operativas tras haber realizados las acciones correctivas. Fuente: Mantenimiento Mina

Después de realizar los ajustes indicados, podemos observar que las medidas del desgaste de los frenos de levante delanteros y posteriores están dentro de los rangos indicados por fábrica.

**Estos resultados indican que se pueden realizar los movimientos de los cables sin detener la Pala.**

Tras haber implementado el plan de acción en enero 2021 se pueden observar los siguientes resultados:

Como se puede ver en la figura 16 (abajo) referente a las palas P&H modelo 4100, el promedio de horas de demora por concepto de mover/agregar cables eléctricos disminuyó considerablemente a partir de ser implementado el proyecto en enero de 2021, disminuyendo en promedio 8 horas por mes de las demoras identificadas en 2019.

Debido a las medidas de seguridad y restricciones a causa del COVID-19; en el año 2020 se priorizaron acciones para prevenir el contagio del COVID-19 y preservar la salud de los trabajadores, además debido a la coyuntura las operaciones no fueron continuas causando que en este año no se implementen proyectos de mejora o se tome como referencia para la toma de datos.

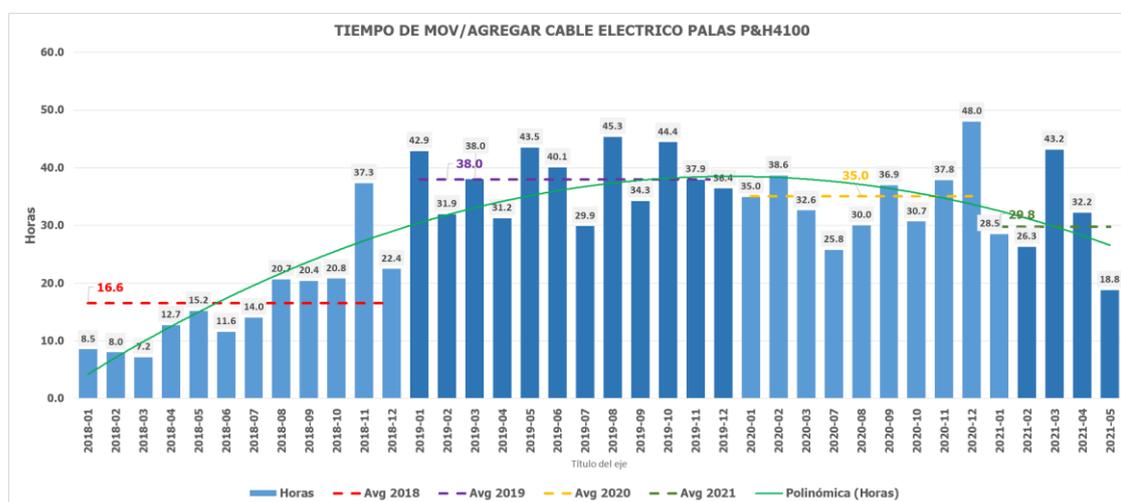


Figura 14 Gráfico de barras del tiempo de las horas de demora por mover/agregar cables eléctricos en las palas eléctricas P&H. Fuente: Gerencia Mina

En el gráfico de barras de la figura 15 (siguiente página) se puede observar el tiempo de demora por concepto de mover/agregar cables eléctricos de las palas eléctricas P&H modelo 4100 durante los 5 primeros meses del 2021, donde se puede notar una tendencia a seguir

registrado valores elevados ocasionados por una falta de seguimiento en los nuevos protocolos establecidos.

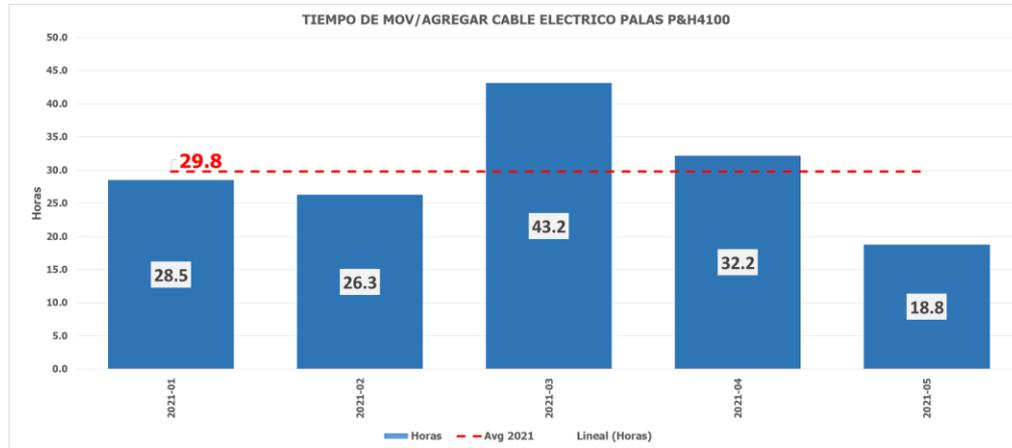


Figura 15 Gráfico de barras del tiempo de las horas de demora por mover/agregar cables eléctricos en las palas P&H 4100 durante el 2021. Fuente: Gerencia Mina

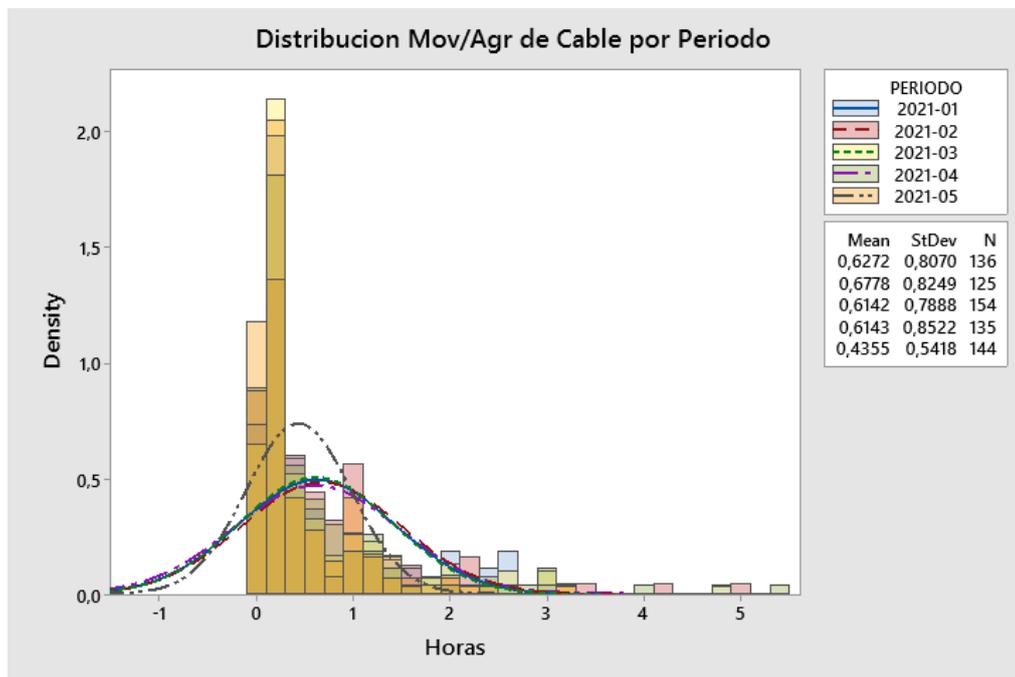


Figura 16 Campana de Gauss de Distribución de las demoras por mover/agregar cables. Fuente: Gerencia Mina

En la figura 1 (arriba), se puede apreciar que a partir del mes de mayo hay una clara tendencia a reducir las horas de demora por concepto de mover/agregar cables eléctricos a las palas P&H.



## **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1. Conclusiones**

- La gestión continua de los indicadores de rendimiento (KPIs) nos permitió encontrar una posibilidad de mejora en uno de sus principales indicadores, la utilización de equipos, que resultó en la implementación del Plan de Mejora que ha logrado disminuir las horas de parada de palas eléctricas por manipulación de cables considerablemente.
- Las medidas de seguridad son necesarias y de vital importancia, sin embargo, éstas no tienen que ir en contra de las metas de productividad, ya que pueden adaptarse y mejorarse de manera que se logren procesos seguros, eficientes y altamente productivos.
- La confiabilidad de un Plan de Mejora en un proceso dependerá de la calidad de información que se procesa y del método utilizado. La metodología Six Sigma nos permitió elaborar un plan concreto, valiéndonos de una rigurosa estrategia para la solución de problemas, utilizando como armas principales las herramientas estadísticas y el análisis de datos.
- El Planeamiento a corto plazo facilita llevar la operación de manera sostenible, asegurando que el aporte de mineral sea continuo.
- La optimización del proceso de carguío depende del tiempo operativo de las palas eléctricas.
- El uso de programas informáticos como el sistema de administración de flota (Dispatch) resultó indispensable en la optimización de la utilización de los equipos de carguío y acarreo.

## 5.2. Recomendaciones

- Las decisiones que se tomen tras eventos relacionados a seguridad deben ser minuciosamente analizadas para atacar la causa raíz; por ejemplo: en este caso de estudio, donde la decisión tomada de parar la pala cuando se realizan movimientos de los cables distaba de ser la solución al problema ya que su causa principal era el desplazamiento del balde de la pala por falla de los frenos de Hoist.
- Frente a eventos de esta naturaleza se debe involucrar a otras áreas y constituir equipos multidisciplinarios para que las decisiones y acciones a tomar como respuesta a un evento sean sostenibles en el tiempo.
- Al utilizar la metodología Six Sigma se pueden eliminar errores y tener controlados los procesos en todo momento, ya que permite establecer variables medibles para analizar la operatividad de cada área de la empresa, y definir cambios o nuevas estrategias para mejorar.
- El personal involucrado en los procesos productivos debe participar activamente en la búsqueda e identificación de oportunidades de mejora.
- Los operadores de las palas deben de realizar la prueba de frenos antes de iniciar sus actividades de carguío para identificar la condición de los frenos, de este modo se evitará cualquier evento no deseado.
- La supervisión de mina debe realizar seguimiento a los protocolos recomendados para garantizar el éxito del presente proyecto.

## REFERENCIAS

- Alberti, A. (2020). *¿Cómo calcular la disponibilidad de una máquina?* ALS Global. Obtenido de <https://www.alsglobal.com/es-co/news/articulos/2020/08/como-calcular-a-disponibilidad-de-maquinas-e-equipamentos>
- Antamina, O. d. (10 de Octubre de 2019). *Antamina mantiene liderazgo como la empresa minera con mejor reputación en el país 2019*. Obtenido de Antamina: <https://www.antamina.com/noticias/antamina-mantiene-liderazgo-como-la-empresa-minera-con-mejor-reputacion-en-el-pais-2019/>
- Bjørnsrud, K. (2002). *Handcars, Kongensgruve*. Kongens Gruve, Kongsberg.
- Compañía Minera Antamina S.A. (2001). *Reporte de Sostenibilidad 2001*. Gerencia de Comunicación Corporativa de CMA., Lima. Obtenido de <https://www.antamina.com/wp-content/uploads/2019/06/reporte-sostenibilidad-2001.pdf>
- Compañía Minera Antamina S.A. (2021). *Quiénes somos: Antamina*. Recuperado el 26 de marzo de 2021, de <https://www.antamina.com/quienes-somos/>
- Delso, D. (s.f.). *Chuquicamata*. Calama.
- Fernandez, J. P. (2020 de enero de 2020). Nueva pala eléctrica de cable P&H 4100XPC, de Komatsu Mining, en Las Bambas. *ENERGIMINAS*.
- Geyer Kabel. (1 de Septiembre de 2020). *Dimensionamiento Adecuado de la Sección del Conductor por Caída de Tensión en Cables Portátiles*. Obtenido de Sitio web Geyer Kabel: <http://geyer-kabel.com/geyernews/articulos/dimensionamiento-ade-cuado-de-la-seccion-del-conductor-por-caida-de-tension-en-cables-portatiles>
- Guerrero, V. (7 de Febrero de 2019). *¿Qué es six sigma?* Obtenido de Sitio Web Lean Solutions: <http://leansolutions.co/que-es-six-sigma/>
- Komatsu. (s.f.). *Productos: P&H 4100XPC AC-90*. Obtenido de Sitio Web de Komatsu Minería: <https://mining.komatsu/es/product-details/p-h-4100xpc-ac-90#!upgrades>
- KOMATSU. (s.f.). *Quiénes somos: Nuestras marcas: P&H*. Recuperado el Junio de 2021, de Sitio web de Minería Komatsu: <https://mining.komatsu/es/compa%C3%B1a/nuestra-compa%C3%B1a/who-we-are/our-brands/p-h>
- MINEM. (s.f.). *UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE ANTAMINA*.



ANEXO 1: GRÁFICO DE TIEMPO DE HORAS TOTALES

