

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

PROPUESTA DE MEJORA A COMPONENTES CRÍTICOS DE
PERFORADORA PIT VIPER 351

Trabajo de Titulación para optar al
Título de Ingeniero en Mantenimiento
Industrial con Licenciatura, modalidad
residencial.

Alumno:

Sr. Lukas Jan Eichholtz Alliende

Profesor Guía:

Mg. Ing. Carlos Baldi González

2024

RESUMEN

Keywords: Análisis Causa Raíz, Time Before Overhaul, Time to Repair.

En el presente trabajo de título, se plantea como objetivo principal identificar y abordar los problemas que afectan el rendimiento de un sistema crítico de la perforadora Pit Viper 351 mediante el uso de Análisis Causa Raíz (ACR). Esto implica analizar en detalle las causas subyacentes de las fallas recurrentes en dicho sistema, con el fin de proponer acciones de mejora específicas que contemplen los tiempos y costos necesarios para su reparación.

Respecto a los objetivos específicos se busca abordar un proceso integral de mejora para la perforadora Pit Viper. Comenzando por una descripción detallada de sus sistemas y el entorno operativo, se avanza hacia la identificación de la causa raíz de las fallas crónicas utilizando la metodología ACR con el fin de validar o descartar sub-causas y evitar la recurrencia del problema. Posteriormente se cuantifican las soluciones propuestas mediante un estudio económico que evalúa los costos y beneficios de la aplicación del ACR, y finalmente se proponen medidas para la mejora continua del sistema.

En el capítulo número uno se realiza una revisión exhaustiva de los distintos componentes que integran a la perforadora Pit Viper 351E, junto con su contexto operativo con el fin de identificar el problema.

En el capítulo número dos se introduce y se desarrolla la metodología de Análisis Causa Raíz permitiendo la identificación de las causas y sub-causas que aquejan al componente en cuestión siendo capaz de validar e invalidar cada una de las posibles causales.

Finalmente, en el capítulo número tres se plantean las propuestas de mejoras de acuerdo con las brechas encontradas mediante la metodología ACR, junto a estas propuestas se realiza un análisis costo beneficio el cual permite y brinda información para la toma de decisión.

ABSTRACT

In the present thesis work, the main objective is to identify and address the issues affecting the performance of a critical system of the Pit Viper 351 drill rig through the use of Root Cause Analysis (RCA). This entails analyzing in detail the underlying causes of recurrent failures in the system, in order to propose specific improvement actions that consider the necessary times and costs for their repair.

Regarding the specific objectives, the aim is to address a comprehensive improvement process for the Pit Viper drill rig. Starting with a detailed description of its systems and operational environment, the focus shifts towards identifying the root cause of chronic failures using the RCA methodology to validate or discard sub-causes and prevent problem recurrence. Subsequently, the proposed solutions are quantified through an economic study that evaluates the costs and benefits of applying RCA, and finally, measures for the continuous improvement of the system are proposed.

Chapter one conducts a thorough review of the various components comprising the Pit Viper 351E drill rig, along with its operational context, in order to identify the problem.

Chapter two introduces and develops the Root Cause Analysis methodology, allowing for the identification of causes and sub-causes afflicting the component in question, capable of validating and invalidating each of the possible causal factors.

Finally, in chapter three, improvement proposals are presented according to the gaps identified through the RCA methodology. Alongside these proposals, a cost-benefit analysis is conducted, which enables and provides information for decision-making.

SIGLAS Y SIMBOLOGÍAS

SIGLAS

ACR	:	Análisis causa raíz
GPM	:	Galones por minuto
KPI	:	Indicador clave de rendimiento
MTTR	:	Tiempo medio de reparación
RCS	:	Sistema de control
RPM	:	Revoluciones por minuto
TBO	:	Tiempo antes de mantenimiento mayor
TSS	:	Sólidos totales en suspensión
TTR	:	Tiempo de reparación
USD	:	Dólar estadounidense

ÍNDICE

Contenido

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO Y CONTEXTO OPERACIONAL	3
1. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. ANTECEDENTES DE LA COMPAÑÍA.....	4
1.1.1. Ubicación.	4
1.1.2. Otros antecedentes.....	6
1.1.3. Empresa colaboradora.	6
1.2. ESQUEMA GENERAL PERFORADORA PIT VIPER 351	7
1.2.1. Datos técnicos	9
1.2.2. Sistema hidráulico	9
1.2.3. Sistema aire-agua	10
1.3. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.....	12
1.4. DESCRIPCIÓN DE COMPONENTE BOMBA DE AGUA	15
CAPÍTULO 2: ANÁLISIS CAUSA RAÍZ.....	17
2. ANÁLISIS CAUSA RAÍZ.....	18
2.1. Metodología Análisis Causa Raiz (ACR)	18
2.2. Desarrollo de Análisis Causa Raiz (ACR).....	19
2.2.1. Definición de problema.....	19
2.2.2. Recopilación de datos.....	20
2.2.1. Profundizar en causas raíz.....	25
2.2.2. Identificación de causas inmediatas	25
2.2.3. Descarte de causas probables	28
CAPÍTULO 3: PROPUESTAS DE MEJORA	37
3. PROPUESTAS DE MEJORA	38
3.1. PROPUESTA “A” INSPECCION SEMANAL	39

3.2.	PROPUESTA “B” MODIFICACION EN PAUTA DE MANTENIMIENTO ...	41
3.3.	EVALUACIÓN DE PROPUESTAS	43
3.3.1.	Evaluación de propuesta “A”. Inspección semanal.....	44
3.3.2.	Evaluación de propuesta “B”. Modificación en pauta de mantenimiento.....	47
3.3.3.	Evaluación de propuesta “A y B”	48
3.3.4.	Mejora medioambiental.....	49
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	50
	BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE LA INFORMACIÓN	51
	ANEXOS	52
	ANEXO 1: DETALLE COSTO DE PRODUCCIÓN POR IMPREVISTO	53
	ANEXO 2. INFORME ANÁLISIS DE AGUA.....	54
	ANEXO 3. ESPECIFICACIONES BOMBA DE AGUA	55

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1-1 “Ubicación Codelco División Andina”	5
Figura 1-2 “Codelco División Andina”	5
Figura 1-3 “Precipitación División Andina”	6
Figura 1-4 “Pit Viper 351 Epiroc”	7
Figura 1-5 “Bomba de agua”	11
Figura 1-6 “Bomba de agua Cat Pump 2530”	15
Figura 1-7 “Vista en corte Cat Pump 2530”	16
Figura 2-1 “Funcionamiento normal bomba de agua”	20
Figura 2-2 “Matriz de criticidad cualitativa del riesgo”	22
Figura 2-3 “Desarme bomba Cat 2520”	26
Figura 2-4 “Daño en cilindros”	26
Figura 2-5 “Daño en sellos internos”	27
Figura 2-6 “Válvula unidireccional de descarga obstruida”	27
Figura 2-7 “Pantalla perforación”	31
Figura 2-8 “Termografía bomba de agua”	34
Figura 2-9 “Propiedad de líquidos”	35
Figura 3-1 “Mantenimiento preventivo diario”	41
Figura 3-2 “Mantenimiento preventivo 1.500 horas”	42
Figura 3-3 “Filtro strainer línea de succión”	45
Figura 3-4 “Criterios pauta de inspección”	45
Figura 3-5 “Puntos añadidos en pauta de mantenimiento”	47
Figura 3-6 “Bombas de agua reemplazadas”	49

ÍNDICE DE DIAGRAMAS

Diagrama 1-1 “Esquema de perforadora”	7
Diagrama 1-2 “Esquema interno perforadora”	8
Diagrama 1-3 “Sistema hidráulico”	10
Diagrama 1-4 “Compresor Pit Viper 351”	11
Diagrama 1-5 “Jacknife componentes”	12
Diagrama 2-1 “Estructura ACR”	19
Diagrama 2-2 “Diagrama Ishikawa”	25
Diagrama 3-1 “Diagrama Ishikawa causas probables”	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 “Datos técnicos Pit Viper 351”	9
Tabla 2-1 “Modos de falla bomba de agua”	21
Tabla 2-2 “Frecuencia de fallas”	23
Tabla 2-3 “Factor impacto en la producción”	23
Tabla 2-4 “Factor costos directos por falla”	23
Tabla 2-5 “Factor de impacto en seguridad”	23
Tabla 2-6 “Factor de impacto ambiental”	24
Tabla 2-7 “Clasificación de modos de falla”	24
Tabla 2-8 “Modos de falla CRÍTICOS”	24
Tabla 2-9 “Mantenimiento preventivo CAT Pumps”	32
Tabla 2-10 “Pauta mantenimiento Epiroc”.	32
Tabla 2-11 “Análisis de agua industrial. ANEXO 2”.	34
Tabla 3-1 “Inspección semanal.”	40
Tabla 3-2 “Pauta de mantenimiento propuesta”	43
Tabla 3-3 “Pauta de mantenimiento propuesta.”	44
Tabla 3-4 “Propuesta de mejora A”	46
Tabla 3-5 “Propuesta de mejora A”	46
Tabla 3-6 “Propuesta de mejora B”	48
Tabla 3-7 “Propuesta de mejora A y B”	48

INTRODUCCIÓN

La industria minera en Chile se desarrolla principalmente en minas a rajo abierto, debido a esto es necesario una gran diversidad de equipos, entre ellos y uno de los más importantes en la cadena de producción son las perforadoras primarias.

La perforación es una actividad esencial en la explotación minera a rajo abierto y desempeña un papel crucial en todo el proceso de extracción de minerales, ya que es la encargada de realizar los pozos de producción en los cuales una vez finalizados se introducen explosivos con el objetivo de realizar tronaduras y poder extraer el mineral del yacimiento.

Epiroc empresa sueca líder en equipos de perforación cuenta con participación significativa en Sudamérica y sobre todo en Chile brindando perforadoras primarias de gran dimensión como la Pit Viper 351E. Las grandes expectativas de producción invitan constantemente a evaluar distintas estrategias y metodologías que aseguren la disponibilidad y confiabilidad.

Sin embargo, como cualquier maquinaria, los componentes críticos de este activo están sujetos a “desgastes y fatigas” con el paso del tiempo, lo que resulta en costosas interrupciones asociadas a pérdidas de producción y cambio de componentes. El componente bomba de agua, representa un componente crítico de la perforadora generando fallas constantes que merman su desempeño.

En el siguiente documento se plantearán propuestas para revertir la falla reiterada del componente, mediante la metodología Análisis Causa Raíz se buscará identificar las causas y sub-causas que aquejan el desempeño de la perforadora.

Uno de los equipos cruciales en la extracción de recursos minerales es la perforadora Pit Viper 351E, equipo ampliamente utilizado en la industria por su capacidad para perforar. Sin embargo, como cualquier maquinaria, los componentes críticos de este activo están sujetos a desgastes y fatigas con el tiempo, lo que puede resultar en costosas interrupciones y pérdidas de productividad.

En este contexto, la presente propuesta busca abordar la mejora de un sistema crítico de la perforadora Pit Viper 351, con el fin de optimizar su rendimiento, prolongar su vida útil y garantizar su funcionamiento en las operaciones mineras, disminuyendo el costo anual, mejorando su rentabilidad y eficiencia operativa.

OBJETIVO GENERAL

Generar una propuesta de mejora a un sistema crítico de la perforadora Pit Viper 351, mediante la aplicación de Análisis Causa Raíz, recomendando acciones de mejora que contemplen tiempos y costos de reparación.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir los diferentes sistemas y subsistemas que componen el funcionamiento de la perforadora Pit Viper 351, y el contexto operacional donde se desempeña, mediante trabajo en terreno y determinando la problemática que aqueja.
- Identificar origen de falla crónica del componente crítico, mediante metodología Análisis Causa Raíz, validando o rechazando cada una de sus sub-causas para evitar la recurrencia del problema.
- Cuantificar las propuestas de solución validadas previamente, mediante estudio económico beneficios de realizar ACR y propuesta de mejora continua.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO Y CONTEXTO OPERACIONAL

1. MARCO TEÓRICO

Con el fin de guiar la comprensión y el análisis del presente trabajo de título se plantea la construcción de un marco teórico esencial para contextualizar el estudio dentro del campo de investigación.

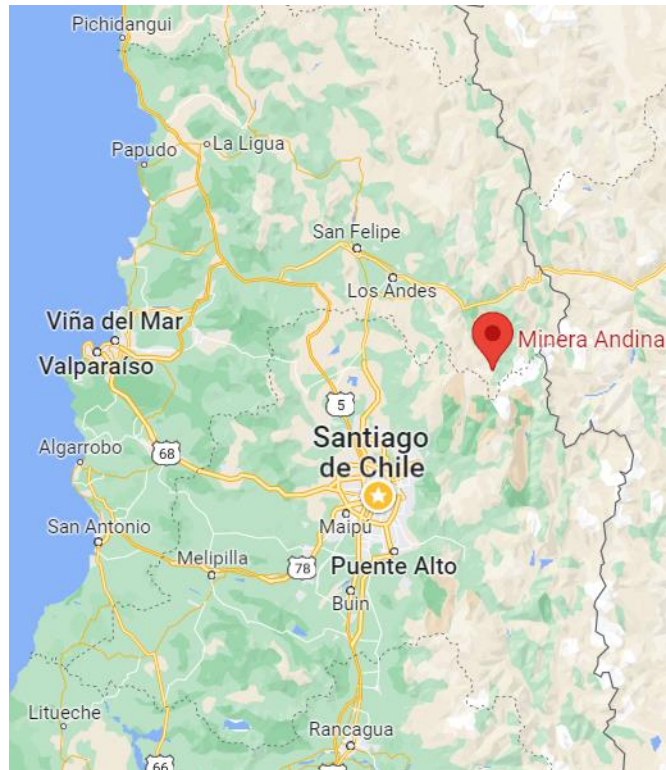
1.1. ANTECEDENTES DE LA COMPAÑÍA

La Corporación Nacional del Cobre de Chile, más conocida como Codelco es una empresa estatal dedicada a la explotación minera fundada el 01 de abril de 1976. Codelco es el productor de cobre más grande del mundo y la empresa que más contribuye a la economía chilena.

La compañía cuenta con siete divisiones entre las cuales se encuentran: Radomiro Tomic, Chuquicamata, Gabriela Mistral, Ministro Hales, Salvador, El Teniente y Andina, siendo esta última división en la que se lleva a cabo el presente trabajo de título.

1.1.1. Ubicación.

Codelco división Andina se encuentra ubicada en la Región de Valparaíso, Chile, específicamente en la comuna de Los Andes, a unos 80 kilómetros al este de la ciudad de Valparaíso. Esta división minera es conocida por su ubicación en la cordillera de Los Andes, rodeada de impresionantes paisajes montañosos. Su ubicación estratégica en esta región minera es vital para la extracción de cobre, ya que alberga una de las minas de cobre más grandes y productivas del mundo, contribuyendo significativamente a la economía chilena.



Fuente: Google Maps.

Figura 1-1 “Ubicación Codelco División Andina”

La explotación de mineral se realiza a rajo abierto (yacimiento Sur Sur) y mina subterránea (Rio Blanco).



Fuente: Diario El mostrador.

Figura 1-2 “Codelco División Andina”

1.1.2. Otros antecedentes

Según lo informado en el reporte de sustentabilidad, durante el año 2022 la compañía logro producir 177.027 toneladas métricas de cobre fino, cuenta con una dotación de 1.540 trabajadores a diciembre del año 2022. La cantidad significativa de nieve que precipita en esta división se debe a la elevada altitud geográfica a la que está localizada sobre los 3.000 mts sobre el nivel del mar, acumulando cerca de 1.100 cm de nieve al año.



Fuente: Fotografía tomada en las dependencias de la empresa

Figura 1-3 “Precipitación División Andina”

1.1.3. Empresa colaboradora.

En Codelco División Andina, Epiroc es la empresa colaboradora encargada de mantener y reparar las perforadoras Pit Viper 351.

Epiroc es una empresa de origen sueco dedicada a la tecnología y soluciones de minería, construcción y energía, que se originó como una división de Atlas Copco en 2017. Atlas Copco, una compañía con una larga historia en la industria de equipos y servicios industriales, decidió dividirse en dos empresas independientes, creando Epiroc como la entidad enfocada en tecnologías de minería, construcción y perforación de rocas.



Fuente: Epiroc.com.

Figura 1-4 “Pit Viper 351 Epiroc”

1.2. ESQUEMA GENERAL PERFORADORA PIT VIPER 351

El diagrama 1-1 muestra el esquema general de un equipo de perforación, si bien el esquema corresponde específicamente a una perforadora Pit Viper 351 Diesel, el principio constructivo y de funcionamiento de los diversos modelos de perforadoras es el mismo, por lo que el esquema resulta muy útil para comprender los distintos sistemas de un equipo de perforación. A partir de la figura 1- 4 presentada anteriormente se puede observar los componentes que se detallan a continuación.

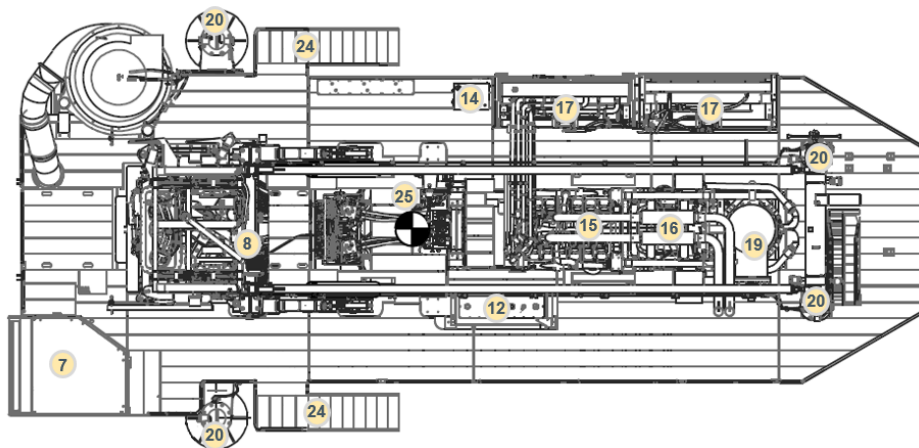


Fuente: Curso Introducción de la maquina Epiroc.

Diagrama 1-1 “Esquema de perforadora”

Donde:

- 1- Torre
- 2- Cabezal de rotación
- 3- Sistema de avance
- 4- Carrusel
- 5- Llave de quiebre
- 6- Llave de muela
- 7- Cabina
- 9- Soporte de barra
- 10- Soporte de torre
- 11- Tirantes Strut
- 12- Estanque hidráulico
- 13- Tubos de escape
- 18- Filtros de aire
- 21- Tren de rodado
- 22- Tanque de combustible
- 23- Sala de maquinas



Fuente: Curso Introducción de la maquina Epiroc.

Diagrama 1-2 “Esquema interno perforadora”

Donde:

- 7- Cabina
- 8- Banco de válvulas hidráulicas
- 12- Estanque hidráulico
- 15- Motor

- 16- Compresor de aire
- 17- Sistema de enfriamiento
- 19- Estanque separador
- 20- Gatos de nivelación
- 24- Escalera de abordaje
- 25- Bombas principales

1.2.1. Datos técnicos

Tabla 1-1 Datos técnicos Pit Viper 351

Pulldown Hidráulico	120.000 Lbf	534 kN
Peso en broca	125.000 Lb	56.700 kg
Pullback Hidráulico	60.000 Lbf	267 kN
Profundidad de paso único	65 Pies	19,8 m
Profundidad máxima pozo	135 Pies	41,1 m
Velocidad de avance	127-158 Pies/min	0,6-0,8 m/s
Cabezal giratorio, torque	19.000 lbf*ft	25,7 kNm
Peso estimado	385.000 Lb – 415.000 Lb	175-188 Toneladas
Compresor rotativo	3.200 cfm@110psi	90,6 m ³ /min@ 7,6 bar
Motor electico Weg 6811	1400 Hp 50Hz	1044 kW 60Hz

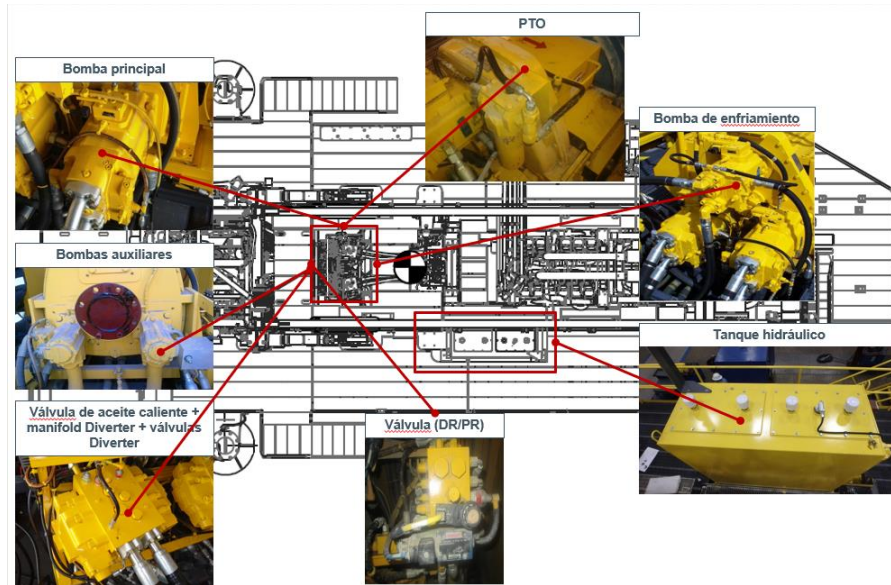
Fuente: Manual Pit Viper 351-E

1.2.2. Sistema hidráulico

La perforadora Pit Viper 351 es una perforadora de producción accionada hidráulicamente. La potencia para accionar el sistema hidráulico es a través de un motor eléctrico Weg 6811, el cual acciona una caja de engranajes que en definitiva acciona cinco bombas hidráulicas. Estas cinco bombas convierten la energía de rotación desde el motor a energía hidráulica que se puede utilizar en motores y cilindros para cumplir las tareas necesarias de perforación y propulsión.

El sistema hidráulico consiste en una serie de sistemas hidráulicos. Cada circuito incluye una o más bombas que suministran fluido hidráulico a cilindros y motores. Los circuitos mayores en esta perforadora son los siguientes:

- Circuito de Propulsión
- Avance de Perforación y Circuito de Rotación
- Circuito de Funciones Auxiliares
- Circuito de Manifold

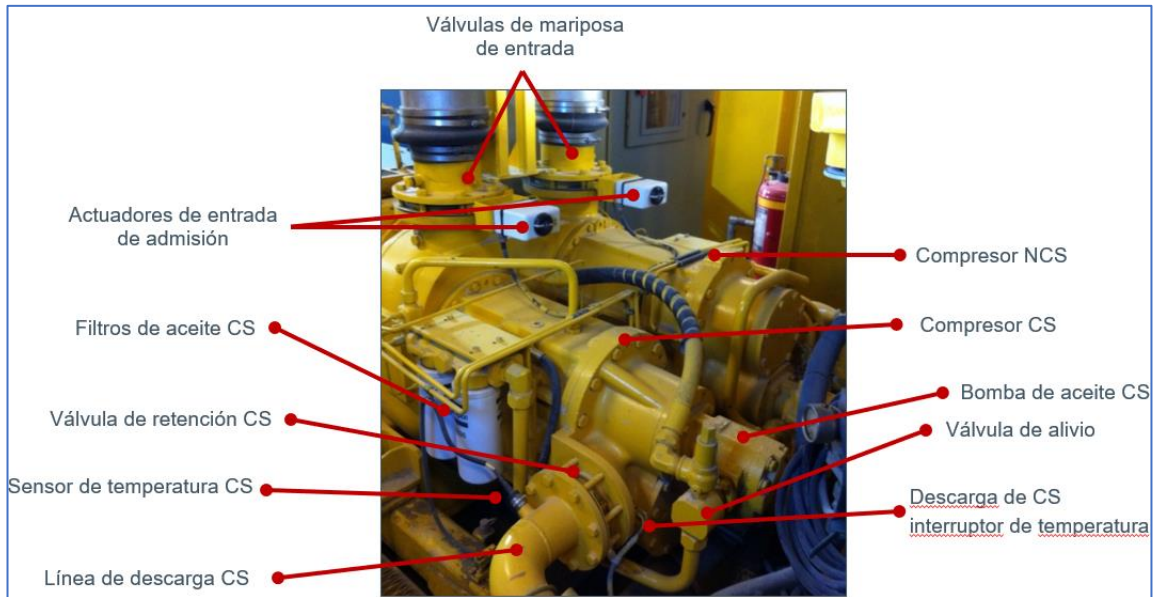


Fuente: Curso Sistema hidráulico Epiroc.

Diagrama 1-3 “Sistema hidráulico”

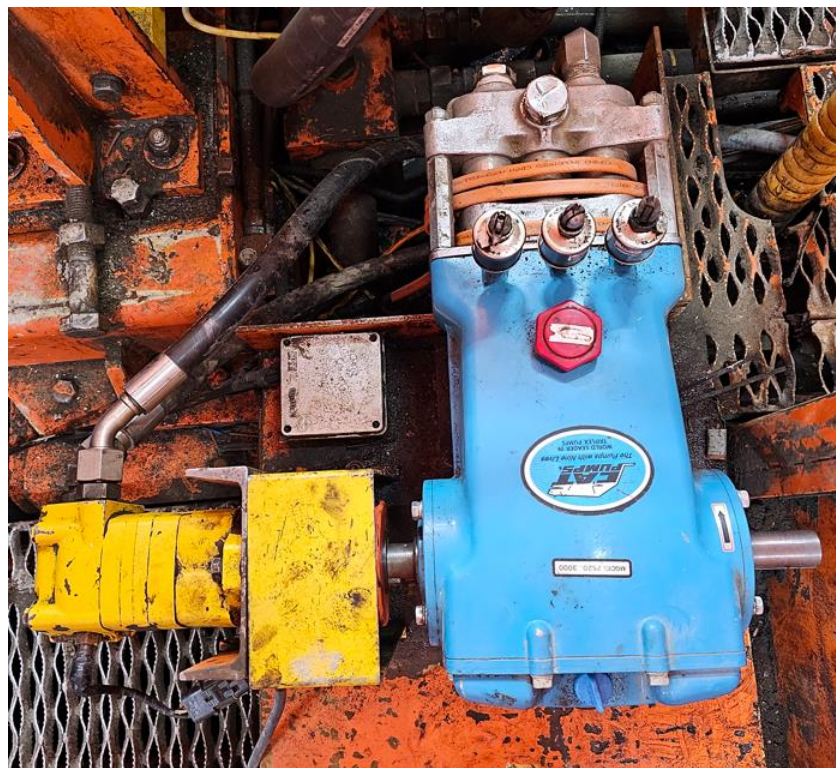
1.2.3. Sistema aire-agua

Este sistema está conformado a grandes rasgos por un compresor y una bomba de agua. El compresor es el encargado de suministrar aire comprimido al estanque acumulador mediante la abertura y cierre de válvulas específicas. Una vez el aire se encuentra dentro del estanque acumulador, este último eleva su presión con el fin de ser liberado a través de la broca de perforación, generando con esto la refrigeración del tricono y al mismo tiempo la limpieza del pozo de perforación. Junto al aire que es expulsado a través de la broca se inyecta un caudal de agua que puede ser graduado por el operador y que es impulsada directamente por la bomba de agua, la cual toma este recurso desde el estanque de agua ubicado en la misma perforadora. El agua es utilizada para generar la compactación de las paredes del pozo y al mismo tiempo disminuir la contaminación que se produce por el polvo en suspensión.



Fuente: Curso Sistema aire-agua Epiroc.

Diagrama 1-4 “Compresor Pit Viper 351”



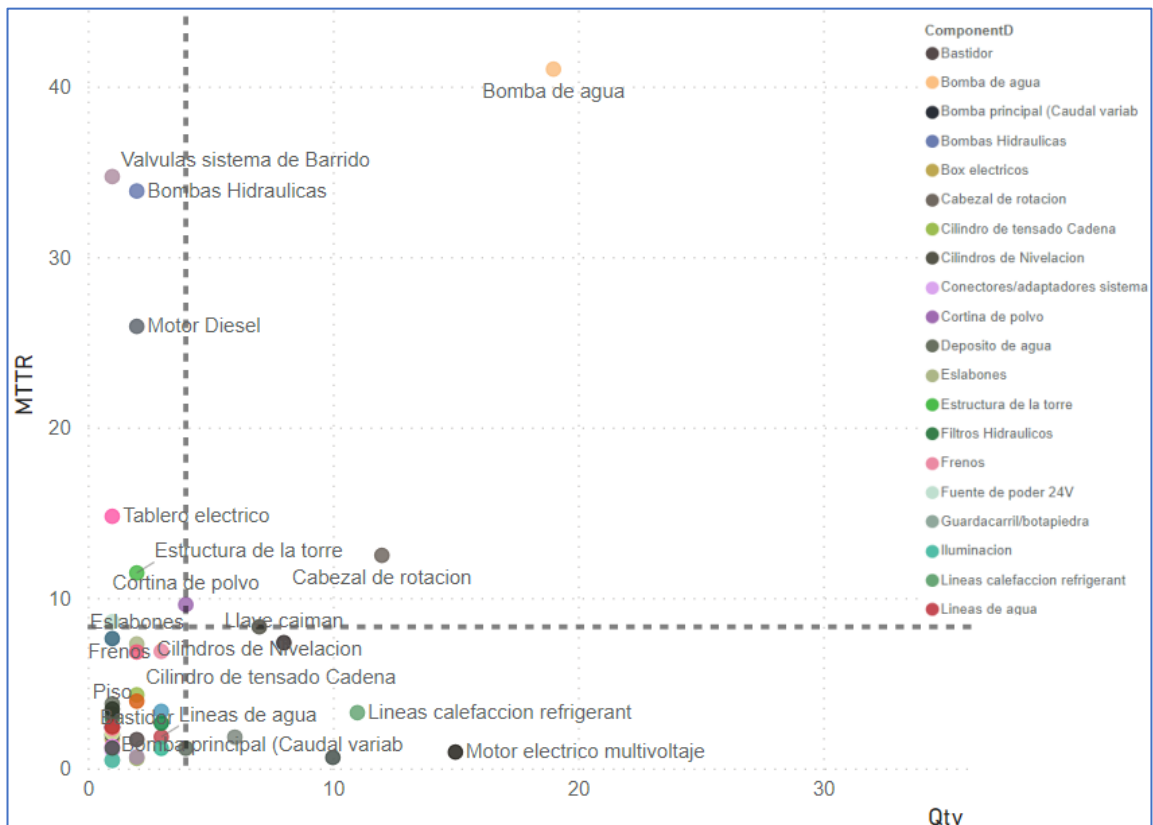
Fuente: Fotografía tomada en terreno.

Figura 1-5 “Bomba de agua”

1.3. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

Epiroc tiene por objetivo ser una compañía rentable y sostenible, proporcionando innovaciones que mejoren la eficiencia y la seguridad a nuestros clientes. Su principal regla es buscar la mejora continua de sus procesos industriales permitiendo con esto un uso eficiente de los recursos generando un alto rendimiento y entregando resultados comerciales sostenibles.

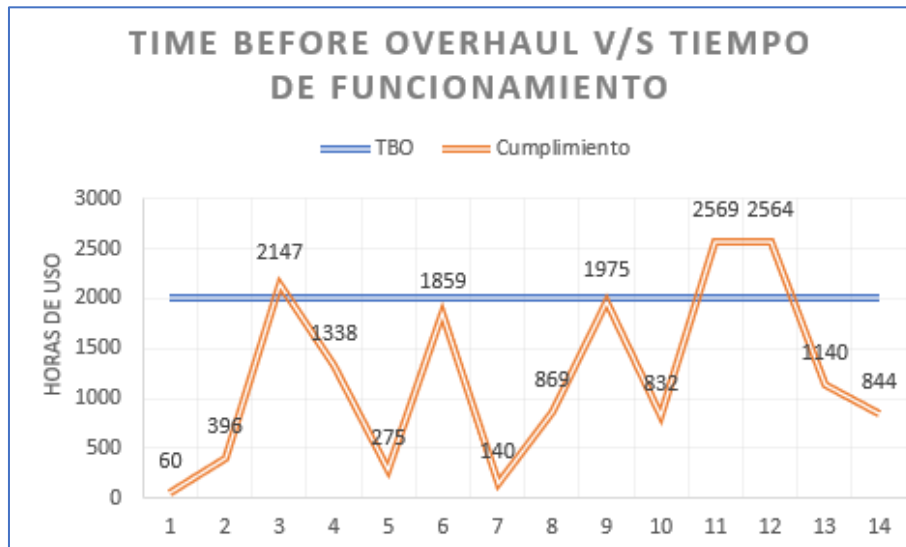
Dentro de la problemática que ha enfrentado esta empresas en Codelco División Andina y específicamente en los equipos de perforación Pit Viper 351E se encuentra el incumplimiento de horas de funcionamiento indicadas por fabricante respecto a la bomba de agua anteriormente mencionada en la descripción del sistema aire-agua. La bomba de agua corresponde a uno de los componentes críticos dentro de la perforadora, esto debido a su rol crucial al momento de realizar pozos de producción entre los cuales destaca: refrigeración del tricono, compactación de las paredes del pozo y al mismo tiempo disminuye la polución producida al momento de la perforación.



Fuente: Epiroc DAND

Diagrama 1-5 “Jackknife componentes”

Como se logra apreciar en el diagrama 1-5, el componente “Bomba de agua”, se encuentra ubicada en el cuadrante “Crónico, Agudo”, lo que implica una frecuencia alta de fallas, y un intervalo de mantenimiento por fallas de alta duración generando con esto una baja confiabilidad y disponibilidad del equipo, como consecuencia perdidas asociadas a la producción y cuestionamiento por parte del cliente.



Fuente: Autor, en base a datos obtenidos Epiroc DAND.

Gráfico 1-1 “TBO v/s Tiempo de funcionamiento”

Como se mencionó anteriormente, existe una gran cantidad de fallas asociadas a la bomba de agua, estas fallas recurrentes han tenido un impacto significativo en la producción y costos de mantenimiento. La constante necesidad de reparaciones y reemplazos ha generado una interrupción en las operaciones, resultando en tiempos de detención prolongados que afectan directamente la eficiencia. La indisponibilidad de la perforadora durante estos periodos ha repercutido en perdidas sustanciales, tanto en términos de producción como en el aumento de los costos de mantenimiento.

El grafico muestra información sobre el componente bomba de agua en una perforadora Pit Viper 351, dicho componente cuenta con un “TBO” (Time Before Overhaul) de 2.000 Hrs. De un total de 14 bombas reemplazadas solo un 21% logra cumplir su tiempo estimado de funcionamiento, cada uno de estos reemplazos de bomba está asociado a un tiempo de reparación “TTR” (Time To Repair), los cuales generan pérdidas de producción.

Costo de producción por imprevisto		
Valor metro perforado	46	[USD]
Metros perforados durante MTTR	164,4	[m]
Costo por imprevisto	\$ 7.563	[USD]

Fuente: Autor.

Dichas pérdidas de producción se ven reflejadas en la tabla anterior, en donde, el costo de no haber perforado durante cada imprevisto se calcula entorno al “MTTR” (Mean Time To Repair) generando pérdidas cercanas a los \$7.563 [USD].

Mientras que el costo directo del imprevisto anualizado implica el valor del componente multiplicado por la cantidad de veces que fue cambiado llegando a la suma de \$123.856 [USD] durante el periodo 2023.

Costo directo anual		
Cambio de bomba	\$ 123.856	[USD]

Fuente: Autor.

Costo total anual		
Costos por imprevistos	\$ 83.192	[USD]
Cambios de bombas	\$ 123.856	[USD]
Total	\$ 207.048	[USD]

Fuente: Autor.

Los costos totales durante el periodo 2023, ascienden a 207.048 [USD], dichos costos contemplan el valor de “pérdidas de producción anuales” y “costos directos” por cambio de componente.

Con la finalidad de mejorar el comportamiento que tiene el componente en cuestión es que se busca realizar una propuesta de mejora al sistema aire-agua, mediante la metodología ACR (análisis causa raíz) generando la erradicación de la falla y aumentando los beneficios económicos que esto conlleva.

1.4. DESCRIPCIÓN DE COMPONENTE BOMBA DE AGUA

Para lograr comprender de forma correcta las fallas presentes en el componente en cuestión es que se lleva a cabo una descripción de la bomba de agua “CAT Pump 2530”.



Model 2530 Shown

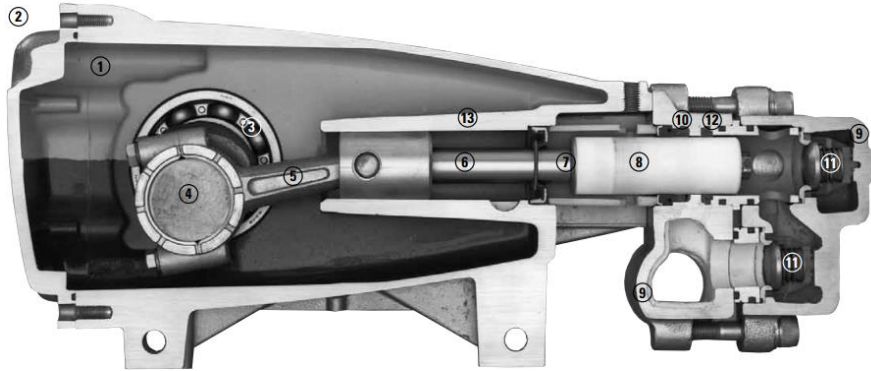
Fuente: Manual de Fabricante

Figura 1-6 “Bomba de agua Cat Pump 2530”

La bomba de agua Cat Pump 2530 corresponde a una bomba de pistones axiales, montados en una superficie rígida (chasis de la perforadora), impulsada por un motor hidráulico con la potencia suficiente para mantener las revoluciones por minuto cuando la bomba está bajo carga. Para los puertos de entrada y salida se utilizan flexibles apropiados los cuales permiten la succión del fluido (agua industrial) y por el puerto de salida la descarga de este líquido.

Este componente es capaz de suministrar 25 GPM a una velocidad de giro máxima de 1025 RPM, los márgenes de presión a los que trabaja pueden fluctuar desde 7 a 70 BAR. La temperatura máxima de funcionamiento está fijada a los 71°C y su peso es de 37.1 Kg. Anexo 3.

Por razones de seguridad, se recomienda realizar tareas de mantenimiento y cambio de componentes los cuales podrían considerar manejo de pesos considerables con la asistencia de dos personas. La colaboración de dos personas no solo garantiza un manejo seguro del componente, sino que también facilitara la ejecución de las tareas, asegurando un mantenimiento adecuado. La seguridad del personal que interviene junto con la del componente son de suma importancia.



Fuente: Manual de Fabricante

Figura 1-7 “Vista en corte Cat Pump 2530”

Donde:

- 1- Carcasa de aluminio
- 2- Medidor nivel de aceite
- 3- Rodamiento de cigüeñal sobredimensionado
- 4- Cigüeñal Cromo-Molibdeno
- 5- Bielas TNM sobredimensionadas
- 6- Barras de embolo
- 7- Deflector de acero
- 8- Émbolos cerámicos
- 9- Múltiples acero de inoxidable
- 10- Sellos húmedos
- 11- Válvulas, asientos y resortes
- 12- Sellos de alta presión
- 13- Cabezal de biela.

CAPÍTULO 2: ANÁLISIS CAUSA RAÍZ

2. ANÁLISIS CAUSA RAÍZ

Para realizar el análisis causa raíz, preliminarmente se debe comprender en que consiste dicha metodología, que factores se involucran y cuál es el paso a paso para su realización. A continuación, se expone la secuencia para llevar a cabo un ACR.

2.1. METODOLOGÍA ANÁLISIS CAUSA RAIZ (ACR)

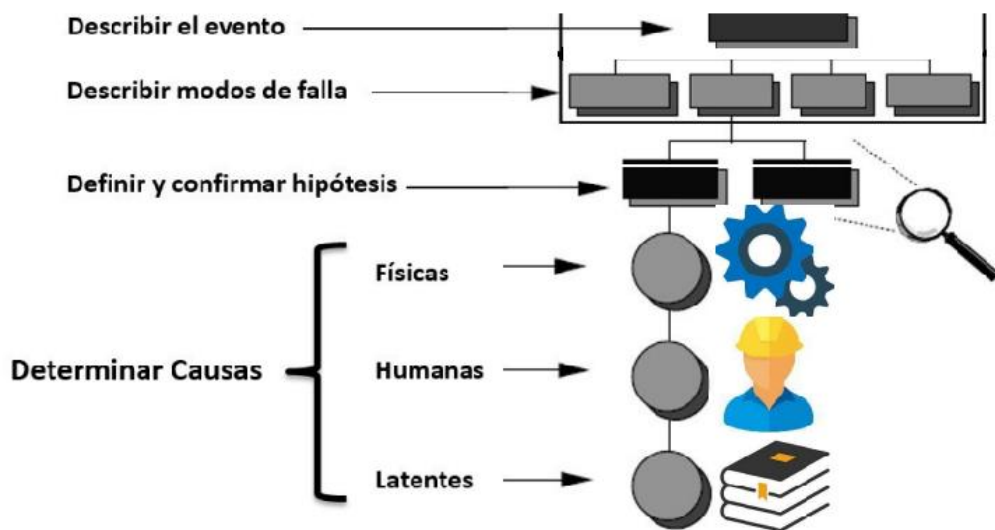
La metodología Análisis Causa Raíz (ACR) es una herramienta poderosa la cual utiliza un enfoque sistemático con el fin de identificar y abordar las causas subyacentes o fundamentales de un problema o incidente en lugar de simplemente tratar los síntomas evidentes, lo que facilita la implementación de soluciones efectivas y duraderas. La norma ISO 55000 proporciona directrices específicas para la gestión de activos físicos, incluido el uso del Análisis de Causa Raíz.

En particular, el artículo 8 de la norma ISO 55000:2014 establece los principios y requisitos para la mejora continua de la gestión de activos, que incluye la aplicación de ACR. Para aplicar el ACR de manera efectiva es crucial seguir un proceso estructurado que incluya los siguientes pasos:

- I. **Definir el problema:** Esto implica describir el problema de manera específica, establecer objetivos claros y definir los criterios de éxito.
- II. **Recopilación de datos:** Recolectar datos relevantes relacionados con el problema, incluyendo información sobre incidentes previos, registros de mantenimiento, datos de operación y cualquier otro dato pertinente que pueda ayudar a comprender la situación.
- III. **Análisis de causas:** Utilizar herramientas como diagrama de Ishikawa, Pareto, análisis de datos estadísticos, entre otros, para identificar y analizar todas las posibles causas del problema.
- IV. **Identificación de la causa raíz:** Una vez que se hayan identificado todas las posibles causas, es necesario profundizar en el análisis para determinar cuál o cuáles son las causas raíz del problema.
- V. **Validar las causas raíz:** Una vez que se haya identificado posibles causas raíz, se debe validar su posible influencia en el problema. Esto implica confirmar si efectivamente estas causas están relacionadas con el problema observado.

- VI. **Desarrollar soluciones:** Una vez identificadas las causas raíz, se debe trabajar en la generación de soluciones efectivas para abordar estas causas y prevenir la recurrencia del problema.
- VII. **Implementar y dar seguimiento:** Lleva a cabo la implementación de las soluciones y realiza un seguimiento para asegurar que funcionen y que el problema no vuelva a ocurrir.

“El Análisis Causa Raíz no solo nos ayuda a solucionar problemas, sino que también nos ayuda a aprender de ellos, fortaleciendo así nuestra capacidad para gestionar de manera proactiva nuestros activos y mejorar continuamente nuestro desempeño operativo” **John Mobley.**



Fuente: Apuntes asignatura Confiabilidad II

Diagrama 2-1 “Estructura ACR”

2.2. **DESARROLLO DE ANÁLISIS CAUSA RAIZ (ACR)**

A continuación, se abordará cada punto expuesto anteriormente con el fin de desarrollar el análisis causa raíz.

2.2.1. **Definición de problema**

Como se mencionó en el capítulo anterior, existe una alta frecuencia de fallas en un tiempo medio de reparación elevado en el componente “bomba de agua”. El problema

está directamente asociado a dicho componente, durante el proceso de perforación de pozos de producción, operador de perforadora Pit Viper 351E realiza accionamiento de “bomba de agua” detectando mediante inspección visual que agua no es inyectada a través de sarta de perforación, solicitando la presencia del personal de mantenimiento para la solución del problema. El impacto de la falla afecta directamente la producción del equipo, ya que, al presentarse, el equipo no puede seguir cumpliendo su propósito y debe quedar fuera de servicio hasta que la condición mejore o retorne a su condición de normalidad.



Fuente: Fotografía tomada en terreno.

Figura 2-1 “Funcionamiento normal bomba de agua”

2.2.2. Recopilación de datos

Dentro de la recopilación de datos, se crea una matriz sobre modos de falla y posible solución que podrían aquejar al componente en cuestión. Dicha matriz es extraída de acuerdo con datos entregados por fabricante y eventos ocurridos durante el funcionamiento del componente.

Tabla 2-1 Modos de falla bomba de agua

MODOS DE FALLA	CAUSA PROBABLE
Baja Presion	Boquilla desgastada
Baja Presion	Deslizamiento de la correa
Baja Presion	Fuga de aire en ducto de entrada
Baja Presion	Manometro inoperativo o registrando de manera inexacta la presion
Baja Presion	Valvula de alivio atascada, parcialmente obstruida o mal ajustada
Baja Presion	Filtro de succion de entrada obstruido o de tamaño inadecuado
Baja Presion	Abrasivo en el liquido bombeado
Baja Presion	Manguera de descarga con fugas
Baja Presion	Suministro de liquido inadecuado
Baja Presion	Cavitacion severa
Baja Presion	Sellos o copas desgastados
Baja Presion	Valvulas de entrada/salida desgastadas o sucias
Pulsaciones	Amortiguador de pulsaciones defectuoso
Pulsaciones	Material extraño atrapado en las valvulas de entrada/salida
Fuga de agua	Copas gastadas o sellos de baja presion
Fuga de agua	Juntas toricas del manguito desgastadas
Fuga de agua	Aire humedo condensandose dentro del carter
Fuga de agua	Desgaste excesivo en sellos y copas
Fuga de agua	Juntas toricas cortadas o desgastadas, superficie rayada en el colector
Ruido de golpeteo	Suministro de liquido inadecuado o insuficiente
Ruido de golpeteo	Rodamiento roto o desgastado
Ruido de golpeteo	Polea suelta en el cigüeñal
Fuga de aceite	Sellos de aceite de carter desgastados
Fuga de aceite	Sellos de aceite de carter desgastados o juntas toricas en la cubierta del rodamiento
Fuga de aceite	Tornillo de drenaje suelto o junta torica del tornillo de drenaje desgastada
Fuga de aceite	Indicador de burbuja suelto o junta de indicador de burbuja desgastada
Fuga de aceite	Tapa trasera suelta o junta torica de la tapa trasera desgastada
Fuga de aceite	Tapa de llenado suelta o exceso de aceite en el carter
Bomba forzada	Entrada restringida o entrada de aire en la tuberia de entrada
Bomba forzada	Valvulas de entrada/salida atascadas
Bomba forzada	Sellos o copas de baja presion con fugas
Fallo prematuro de la copa o sello	Cilindros o camisas rayadas
Fallo prematuro de la copa o sello	Borde frontal del piston afilado
Fallo prematuro de la copa o sello	Presion excesiva en el colector de entrada
Fallo prematuro de la copa o sello	Material abrasivo en el liquido que se esta bombeando
Fallo prematuro de la copa o sello	Presion y/o temperatura excesiva del liquido bombeado
Fallo prematuro de la copa o sello	Funcionamiento de la bomba en seco
Fallo prematuro de la copa o sello	Restriccion a la bomba de liquido adecuado
Fallo prematuro de la copa o sello	Colector erosionado

Fuente: Autor.

Al llevara a cabo el estudio de los modos de falla, se realiza el análisis del grado de criticidad de fallas mediante la metodología FMEA (Análisis de Modos y Efectos de Falla). Para realizar este estudio, se debe clasificar el tipo de fallas con el fin de evocar los esfuerzos en determinado grupo de fallas. La clasificación queda de la siguiente forma:

- **Falla No Critica:** corresponde a un grupo de fallas que no afectan en gran magnitud la disponibilidad ni confiabilidad del equipo o aquellas fallas que su consecuencia de ocurrencia es leve.
- **Falla Semi Critica:** son aquellas fallas que repercuten medianamente en la funcionalidad del equipo, su riesgo y consecuencia es mediano, no alcanzando los limites superiores de criticidad.

- **Falla Crítica:** falla que normalmente genera la pérdida de la función del equipo, afectando de forma inmediata o potencial la producción, su frecuencia y consecuencia tienden a ser altas.

FRECUENCIA	5	Zona Crítica			
	3	Zona Semi Crítica			Zona Crítica
	1	Zona No Crítica			
CRITICO		20	50	70	100
SEMI CRITICO					
NO CRITICO		CONSECUENCIA			

Fuente: Autor. En base a Jerarquización de Activos MCCR. Carlos Parra.

Figura 2-2 “Matriz de criticidad cualitativa del riesgo”

Con respecto al desarrollo de la matriz de riesgo:

- **Eje Vertical (frecuencia de fallos):** 3 filas, valor máximo 5 puntos (escala 1;3;5)
- **Eje Horizontal (consecuencia de fallos):** 4 columnas, valor máximo de 100 (escala 20;50;70;100)
- Para la subcategoría de consecuencia $C = (IP \times CD) + (IS \times IA)$, los pesos de importancia asignados en la MCCR fueron los siguientes (El porcentaje de importancia asignado a cada factor de las consecuencias, esta alineado con los objetivos del negocio y fueron designados por el autor):
 - $IP \times CD$ = Representa el 90% del peso total de las consecuencias.
 - $IS \times IA$ = Representa el 10% del peso total de las consecuencias.

A continuación, se presentan los factores de ponderación de frecuencia de fallos (FF) y consecuencias (C) para la evaluación de criticidad en la matriz de riesgo:

Tabla 2-2 Frecuencia de fallas

TABLA DE FRECUENCIA DE FALLAS		
FRECUENCIA DE FALLAS	FALLAS AL AÑO	VALOR
EXCELENTE	≤1	1
BUENO	2-3	2
MEDIO	4-5	3
MALO	≥5	4

Fuente: Autor.

Tabla 2-3 Factor impacto en la producción

FACTOR IMPACTO EN LA PRODUCCION		
FACTOR IMPACTO PRODUCCION	CONSECUENCIAS	VALOR
BAJO	<\$5.000	1
MEDIO	\$5.000 - \$15.000	5
MALO	>\$15.000	10

Fuente: Autor.

Tabla 2-4 Factor costos directos por falla

FACTOR COSTOS DIRECTOS POR FALLA		
FACTOR COSTOS DIRECTOS POR FALLA	CONSECUENCIAS	VALOR
BAJO	<\$5.000	1
MEDIO	\$5.000 - \$15.000	5
MALO	>\$15.000	10

Fuente: Autor.

Tabla 2-5 Factor de impacto en seguridad

FACTOR DE IMPACTO EN SEGURIDAD		
FACTOR IMPACTO EN SEGURIDAD	CONSECUENCIAS	VALOR
BAJO	MENOR IMPACTO EN SEGURIDAD	1
MEDIO	IMPACTO MEDIO EN SEGURIDAD	5
MALO	IMPACTO ALTO EN SEGURIDAD	10

Fuente: Autor.

Tabla 2-6 Factor de impacto ambiental

FACTOR DE IMPACTO AMBIENTAL		
FACTOR IMPACTO AMBIENTAL	CONSECUENCIAS	VALOR
BAJO	MENOR IMPACTO AMBIENTAL	1
MEDIO	MEDIO IMPACTO AMBIENTAL	5
MALO	ALTO IMPACTO AMBIENTAL	10

Fuente: Autor.

Tabla 2-7 Clasificación de modos de falla.

CANTIDAD DE MODOS DE FALLA		39
NO CRITICO	31 MODOS DE FALLA	79%
SEMI CRITICO	4 MODOS DE FALLA	10%
CRITICO	4 MODOS DE FALLA	10%

Fuente: Autor.

Al finalizar el proceso de clasificación de los modos de falla que aquejan al componente “bomba de agua” se obtuvieron los resultados obtenidos en donde:

- **Modos de falla NO CRITICOS:** se determinan 31 modos, cuyo peso relativo corresponde a un 79%.
- **Modos de falla SEMI CRITICOS:** se determinan 4 modos de falla, cuyo peso relativo corresponde a un 10%.
- **Modos de falla CRITICOS:** se determinan 4 modos de falla, cuyo peso relativo corresponde a un 10%.

Al analizar los modos de falla críticos, se observa que estos tienen un factor en común, están directamente relacionados con el “fallo prematuro de sellos, cilindros y camisas rayadas”.

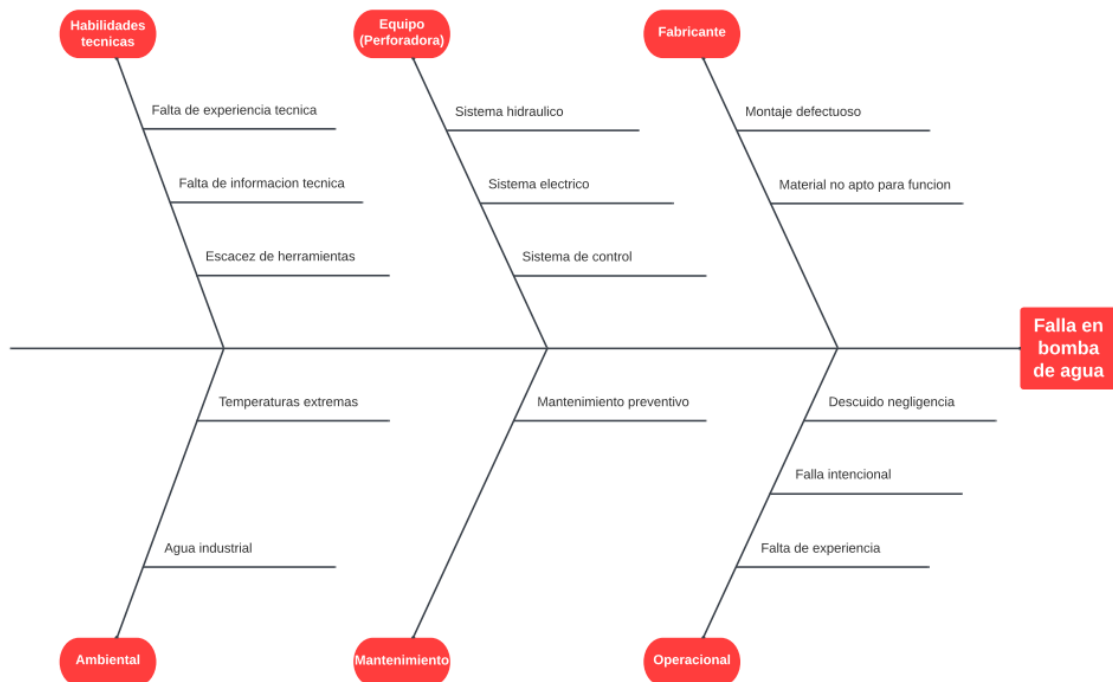
Tabla 2-8 Modos de falla CRÍTICOS

Falla	Modos de falla	Riesgo	Cualitativa
Baja presión	Sellos o copas desgastados	113	CRITICO
Bomba forzada	Sellos o copas de baja presión con fugas	452,5	CRITICO
Fallo prematuro de la copa o sello	Cilindros o camisas rayadas	452,5	CRITICO
Fallo prematuro de la copa o sello	Material abrasivo en el líquido que se está bombeando	125	CRITICO

Fuente: Autor.

2.2.1. Profundizar en causas raíz

Para profundizar en las causas raíz del problema, se lleva a cabo un diagrama Ishikawa (espina de pescado) el cual permite mediante su metodología mostrar de manera esquemática las posibles causas de un problema. Su finalidad es organizar racionalmente el análisis de un problema.



Fuente: Autor.

Diagrama 2-2 “Diagrama Ishikawa”

2.2.2. Identificación de causas inmediatas

Durante el proceso de estudio, se procede a realizar el desarme de varias bombas de agua marca “Cat pumps 2520”, se realiza el reconocimiento de diversos componentes internos junto con su funcionamiento integral.

Al realizar el desarme de la bomba anteriormente mencionada se observan los siguientes hallazgos. [ver figura 2-4]



Fuente: Autor.

Figura 2-3 “Desarme bomba Cat 2520”



Fuente: Autor.

Figura 2-4 “Daño en cilindros”

En la se logra apreciar piquetes en la parte exterior de los cilindros internos de la bomba de agua, posiblemente producto de algún cuerpo extraño que ingreso al interior de la bomba causando el daño anteriormente mencionado.



Fuente: Autor.

Figura 2-5 “Daño en sellos internos”

Se observa daño abrasivo y desprendimiento en sellos de pistones, los cuales al no cumplir su función de sellado son incapaces de generar un caudal óptimo para el proceso de perforación.



Fuente: Autor.

Figura 2-6 “Válvula unidireccional de descarga obstruida”

En la imagen 2-6 se logra apreciar el interior de una válvula unidireccional de descarga, esta válvula está ubicada a la salida de la bomba. En su interior se observa una obstrucción la cual no permite su funcionamiento óptimo, que es cerrar el paso de fluido en un sentido. El material que se encuentra en su interior corresponde a un trozo de sello, al mismo tiempo se detecta partículas de corrosión y sedimentos.

2.2.3. Descarte de causas probables

La tarea de descartar causas probables en la resolución de problemas es un componente esencial en el proceso de análisis. Al enfrentar un problema, es crucial identificar no solo las posibles causas raíz, sino también aquellas que, a pesar de ser inicialmente consideradas, no contribuyen significativamente al problema en cuestión. Este proceso de descarte implica un criterio riguroso y una evaluación cuidadosa de las hipótesis planteadas, con el fin de enfocar los recursos y esfuerzos en las áreas más relevantes.

A continuación, se realiza una evaluación de las hipótesis planteadas en el diagrama Ishikawa figura 2-2.

- I. Causa fabricante: los fabricantes llevan a cabo una amplia variedad de pruebas en sus productos para garantizar su calidad, seguridad y rendimiento antes de ser lanzados al mercado. Estas pruebas pueden abarcar pruebas reales de funcionamiento en condiciones óptimas de uso e incluso en condiciones hostiles; todo esto para evaluar su resistencia, durabilidad y calidad. Estas pruebas están diseñadas para detectar posibles defectos de fabricación con el fin de cumplir con los estándares y regulaciones aplicables.

Bajo este planteamiento, fabricante entrega una lista de materiales de alta resistencia que integran a la bomba de agua, cada uno de estos materiales escogidos de forma precisa de acuerdo con la función que debe desempeñar cada elemento para garantizar un correcto funcionamiento. Cat Pumps empresa fabricante del componente especializada en fabricación de bombas de agua de alta presión es una empresa internacional que cuenta con 56 años de trayectoria, dentro de estos años se ha caracterizado por ser un líder confiable y eficiente por lo que se asume que sus bombas son de calidad y que la falla repetitiva no es atribuible a un problema de fabricación. Se descarta hipótesis.

- II. Causa operacional: un operador puede generar una falla por diversas razones, algunas de las cuales incluyen:
 - a. **Error humano:** los errores pueden ocurrir debido a la falta de capacitación, falta de atención, fatiga, distracciones o simplemente falta de comprensión de los procedimientos.
 - b. **Descuido o negligencia:** la falta de motivación, desinterés en el trabajo puede generar que no se sigan los procedimientos adecuados debido a la complacencia.
 - c. **Falta de experiencia:** los operadores nuevos o aquellos que no están completamente familiarizados con el equipo pueden cometer errores debido a su inexperiencia.

- d. **Condiciones de trabajo inadecuadas:** cuando las condiciones de trabajo no son óptimas debido a factores como iluminación deficiente, baja visibilidad, ruido excesivo, o falta de mantenimiento en los equipos, los operadores son propensos a cometer errores que pueden provocar fallas.
- e. **Mal funcionamiento intencional:** en algunos casos, los operadores podrían cometer un acto de sabotaje o mal funcionamiento intencional, ya sea por motivos personales o resultado de conflictos laborales.
- f. **Falta de supervisión adecuada:** si los operadores no son supervisados de forma adecuada, pueden sentirse menos responsables de sus acciones y ser más propensos a cometer errores.

Para analizar los puntos anteriormente mencionados relacionados con “causa operacional” es importante analizar las medidas preventivas y correctivas que aborden las razones de estas posibles fallas.

Al analizar el factor del error humano, los operadores de perforadoras junto a los operadores de palas hidráulicas o eléctricas, tienden a ser los más capacitados y con experiencia en la operación de equipos pesados para la minería, esto debido a que para operar dichos equipos previamente deben haber cumplido con una serie de capacitaciones y cursos, avanzando por diversos equipos dentro de los cuales se destacan los equipos de movimiento de tierras (bulldozer, excavadoras, moto niveladoras, camiones de extracción minera, entre otros). Su instrucción conlleva horas de operación de los equipos, pruebas relacionadas directamente con los procedimientos propios del equipo como internos de la faena. Si bien, el error humano se puede reducir mediante la aplicación de medidas preventivas y correctivas siempre existe la probabilidad de cometerlo. “Errar es humano” Publio Terencio.

Su motivación diaria conlleva la evaluación de su desempeño respecto a KPIs, la existencia de un bono de producción directamente relacionado a los metros perforados, seguridad, asistencia, aumentan las ganancias de cada operador generando en ellos la búsqueda constante de mantener el equipo operativo y realizando sus actividades de la mejor forma posible.

Como se mencionó anteriormente, la falta de experiencia de los operadores no es un factor influyente en la falla, para obtener licencia de operador de perforadoras se debe cumplir con una serie de requisitos los cuales en muchas ocasiones tardan años en ser aprobados. Una vez que el operador obtiene su licencia interna, es acompañado y evaluado por un tiempo prolongado por el instructor de perforación, quien corrige y aconseja desde su experiencia como instructor al nuevo operador capacitándolo para desempeñar su función de forma óptima y minimizando errores.

Respecto a las condiciones de trabajo inadecuadas, entra el perfil de los mantenedores quienes son los encargados de mantener el equipo en óptimas condiciones generando que sea un equipo confiable capaz de ejecutar todas las funciones que le competen. Una de las funciones principales de los operadores es informar de forma oportuna los desperfectos que aquejan al equipo, optimizando los tiempos de reacción de los mantenedores y evitando que el equipo quedé fuera de servicio por un tiempo prolongado e incluso que la falla en cuestión se agudicé. Esta función se ejecuta de forma inmediata al existir un imprevisto, el operador informa y los técnicos deciden si el equipo puede seguir perforando o se detiene y se corrige la falla.

En Codelco, se fomenta una cultura organizacional basada en la confianza y respeto mutuo entre empleados, empleadores y contratistas. Existen procedimientos y programas de denuncias seguros y confidenciales para abordar de forma oportuna cualquier preocupación o conflicto laboral evitando con esto la mal intencionalidad de los operadores respecto a sabotear los equipos ya sea por motivos personales, o conflictos de interés. Al mismo tiempo y como se mencionó anteriormente los operadores son evaluados respecto a KPIs internos por lo que al sabotear los equipos los perjudicados son ellos mismos.

Dentro de la línea de supervisión, constantemente se visualiza la figura del “supervisor de perforación y tronadura”, encargado de inspeccionar, controlar, observar el desempeño de los operadores, brindando asesoría a cada uno de los operadores. Se descarta hipótesis de falla operacional.

- III. Causa perforadora: al evaluar la causa perforadora, se considera la posibilidad de que algún sistema interno del equipo ya sea mecánico, hidráulico o eléctrico, falle, lo que resulta en la falta de funcionamiento de la bomba. En el transcurso del año 2023, Epiroc llevo a cabo una actualización del sistema operativo de la perforadora Pit Viper, pasando de un sistema denominado “Aquila” a uno conocido como “Rig Control System” o RCS5. Este último representa una plataforma avanzada de control y monitoreo ampliamente empleada en equipos de perforación en la industria minera, capaz de mejorar significativamente la eficiencia, la seguridad y el rendimiento de las operaciones de perforación. Esto se logra mediante la implementación de una extensa red de sensores que detectan cualquier anomalía, la cual se presenta de forma directa en la pantalla del operador. Bajo este enfoque, se descarta la posibilidad de que la falla del componente provenga de alguno de los sistemas mencionados anteriormente. De ser así, la falla sería evidente para el operador, y los sistemas de protección del equipo detendrían la perforación, lo que requeriría la intervención del personal de mantenimiento.



Fuente: Presentación Epiroc.

Figura 2-7 “Pantalla perforación”

En la imagen superior, se logra visualizar la pantalla de perforación, en esta se observa el porcentaje de llenado del estanque de agua y a su lado el caudal que entrega la bomba [gal/min]. Como se mencionó anteriormente, el sistema de control RCS5 es capaz de entregar información precisa y en tiempo real permitiendo con esto mantener un diagnóstico y control sobre la salud del equipo descartando la posibilidad de que la falla sea producto de un error en otros sistemas. Se descarta hipótesis falla de perforadora.

- IV. Causa mantenimiento: el mantenimiento preventivo sugerido por el fabricante es fundamental para garantizar el funcionamiento óptimo y prolongar la vida útil del componente “bomba de agua”. Seguir las recomendaciones del fabricante, realizar una serie de acciones periódicas, como inspecciones regulares de los componentes, lubricación efectiva de partes móviles, limpieza de filtros, verificación de caudal son tareas que ayudan a detectar y corregir posibles problemas potenciales antes de que se causen daños mayores. Además, el mantenimiento preventivo contribuye a reducir costos de reparación, costos operacionales, asegurando un rendimiento confiable y una operación continua. Bajo este concepto es que se compara el mantenimiento sugerido por fabricante v/s el mantenimiento realizado por la empresa contratista.

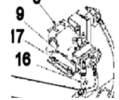
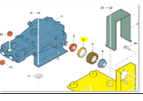
Tabla 2-9 Mantenimiento preventivo CAT Pumps

PREVENTATIVE MAINTENANCE CHECK-LIST						
Check	Daily	Weekly	50 hrs.	500 hrs.*	1500 hrs.**	3000 hrs.**
Clean Filters	x					
Oil Level/Quality	x					
Oil Leaks	x					
Water Leaks	x					
Belts, Pulley		x				
Plumbing		x				
Initial Oil Change			x			
Oil Change				x		
Seal Change					x	
Valve Change						x
Accessories					x	

Fuente: Manual de mantenimiento CAT Pumps.

La empresa fabricante de la bomba sugiere una serie de actividades como mantenimiento preventivo asignando periodos que van desde actividades “diarias”, “semanales”, “50 hrs”, “500 hrs”, “1.500 hrs”, “3.000 hrs”.

Tabla 2-10 Pauta mantenimiento Epiroc.

ID	ACTIVIDAD	LIMITES ACEPTABLES, RECOMENDACIONES	BUENO	MALO	COMENTARIOS ADICIONALES	P1: REP. EN ESTA DETENCION/ P2: PROGR. EN PROX. DETENCION	NOMBRE DEL TECNICO
A.26	Comprobar sistema de inyección agua	Visualizar salida de agua por el tricono					
C.5	Tomar muestra de aceite bomba inyección agua	Retiro desde bomba de agua. No tomar muestras del fondo de los componentes. No tomar muestra con aceites decantados en los componentes. No exponer la sonda ni el bombín al polvo ambiental.					
C.7	Cambio de aceite bomba de agua	Reemplazo de aceite					
Ñ.0	Sistema inyección de agua						
Ñ.2	Realizar limpieza de filtro de línea succión	Limpiar filtro de malla de línea de succión (strainer).					
Ñ.3	Limpiar sensor de nivel estanque	Confirmar funcionamiento mecánico de sensor dentro de estanque agua, aguja analoga debe indicar mismo valor de pantalla.					
Ñ.4	Verificar estado de válvula check de descarga 3/4"	Realizar revisión de válvula de descarga, esta debe impedir el paso del aire hacia el cuerpo de la bomba de agua.					
Ñ.6	Cambiar valvulas check sistema inyección (succión 1" y descarga 3/4") Nota: No botar valvulas cambiadas, entregar a jefe de turno						
Ñ.7	Revisión de estado de cadena acoplamiento bomba de agua. Se debe retirar guarda de protección de bomba, luego visualizar estado de cadena, seguro de cadena y chaveta de bomba de agua.						
Ñ.8	Rellenar vasos lubricadores	Ajustar 1 gota cada 60 segundos					

Fuente: Pauta mantenimiento Epiroc.

Tabla 10. Pauta mantenimiento Epiroc.

Al realizar el análisis comparativo entre las directrices de mantenimiento preventivo proporcionadas por el fabricante de la bomba de agua y las prácticas ejecutadas por la empresa contratista, se revelan discrepancias significativas que pueden conducir al fallo prematuro del componente. El fabricante de la bomba de agua en su documentación técnica destaca la importancia de realizar una serie de acciones, desde inspecciones regulares, cambios de aceites, cambios de sellos, hasta cambios de válvulas.

Sin embargo, al examinar la pauta de mantenimiento de la empresa a cargo, se observan desviaciones importantes con respecto a estas recomendaciones. Por ejemplo, la limpieza de filtros se realiza cada 500, 1.000, 1.500, 2.000 hrs, respectivamente mientras que fabricante indica que se debe realizar cada día. Otro punto por tener en consideración es el cambio de sellos, el cual se debiese realizar cada 1.500 hrs y no figura en la pauta de mantenimiento de la empresa a cargo del componente.

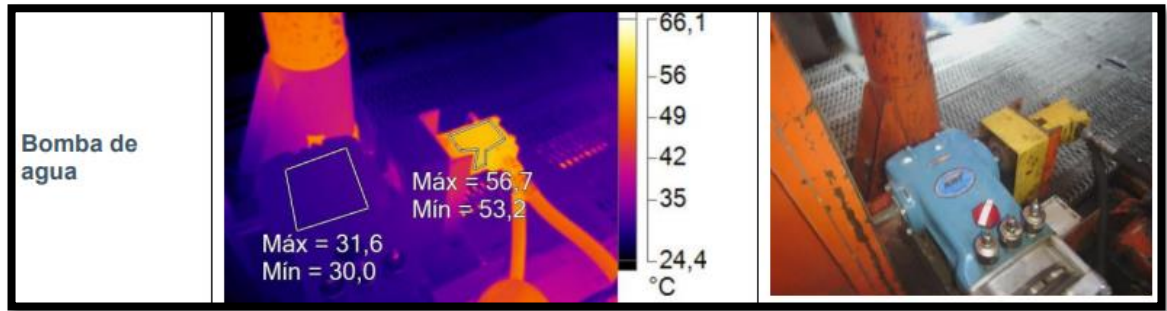
Esta discrepancia entre las prácticas actuales y las recomendaciones del fabricante subraya la importancia de revisar y ajustar ciertos procedimientos de mantenimiento con el fin de garantizar el funcionamiento óptimo y seguro del componente.

Se acoge la “causa mantenimiento” como posible causa raíz del problema.

- V. Causa ambiental: las bombas de agua pueden ser susceptibles a una variedad de condiciones ambientales que podrían dañarlas entre las cuales se destacan las siguientes:

- a) **Temperaturas extremas**: como se mencionó anteriormente, el componente bomba de agua se encuentra montado en una perforadora PitViper 351-E ubicada en Codelco división Andina, faena localizada en la alta cordillera de Los Andes, ambiente en el cual gran parte del año las temperaturas bordean los 0° centígrados e incluso temperaturas bajo cero. A pesar de esto, el componente se encuentra resguardado al interior de la sala de máquinas del equipo, por lo que, no se encuentra expuesto a la intemperie ni a la exposición de frío directo por lo que no es un factor para tomar en consideración.

La máxima temperatura permisible del componente según fabricante corresponde a los 71° centígrados, al realizar un ensayo termográfico se obtienen valores cercanos a los 30° centígrados descartando que la falla sea producto de “Temperaturas extremas”.



Fuente: Autor.

Figura 2-8 “Termografía bomba de agua”

- b) **Agua industrial:** La presencia de partículas sólidas en el agua, como arena, sedimentos o residuos, puede desgastar los componentes de la bomba, incluidos los pistones, sellos y válvulas, lo que puede provocar obstrucciones, reduciendo la eficiencia y confiabilidad de la bomba. Para analizar este punto, se realiza un análisis de agua industrial obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 2-11 Análisis de agua industrial. ANEXO 2.

1 mg/L	=	1 ppm		
ANALISIS	UNIDAD	LD (limite de deteccion)	MUESTRA	
Aluminio	mg/L	0.04	3,29	
Calcio	mg/L	0.01	34,25	
Cobre	mg/L	0.01	5,53	
Dureza Total (como CaCO3)	mg/L	0.05	118,10	
Hierro	mg/L	0.01	4,07	
Magnesio	mg/L	0.01	7,88	
Manganeso	mg/L	0.01	1,18	
Silicio	mg/L	0.1	2,20	
Sodio	mg/L	0.01	2,90	
Cinc	mg/L	0.01	0,26	
Estroncio	mg/L	0.01	0,12	
Potasio	mg/L	0.01	0,21	
		TSS (total suspension solids)	180,0	ppm

Fuente: Autor.

Para comprender de mejor forma los resultados obtenidos en el análisis de agua industrial, se debe definir en primera instancia el significado de “TSS” o “Total suspensión solids”. TSS es una medida utilizada en la calidad del agua para describir la cantidad de material sólido que está suspendido en el agua y que no se ha disuelto. Estos sólidos pueden incluir sedimentos, materiales en suspensión y otros contaminantes. Los sólidos totales en suspensión pueden provenir de diversas fuentes, como la erosión del suelo, desechos industriales, entre otros. Altos niveles pueden indicar una mala calidad del agua y pueden tener impactos negativos en sistemas de bombeo de agua.

A partir de la definición anterior, se analizan los resultados obtenidos y se comparan con lo indicado en el manual de fabricante de las bombas encontrando la siguiente desviación:

Liquid Properties

Pumping liquids with suspended solids is not recommended. Solids can become trapped in valves and other components causing malfunction. Cat Pumps does offer stainless steel submersible centrifugal pumps that can handle larger suspended solids (up to 3/8”).

Some liquids will contain abrasive solids. Abrasion can come from harsh mineral conditions of water (i.e., hard water, dirty water, gritty water, reclaim water) causing excessive wear of pump components. Water softeners can reduce hard water conditions. Inlet filters and settling tanks can help with dirty, reclaim or gritty water conditions. For optimum life performance we recommend water quality meet the specification below:

- Particle size not to exceed 50 micron
- TSS not to exceed 50 PPM
- pH maintained between 5-9
- Sediment pits must be cleaned regularly
- Reclaim and pumping system must be kept in good operating condition

Fuente: CAT Pumps.

Figura 2-9 “Propiedad de líquidos”

Fabricante indica que dentro de las propiedades de los líquidos utilizados en bombas de pistón el factor TSS no debe superar las 50 partículas por millón PPM, al analizar la muestra de agua industrial se detectan un total de 180 PPM siendo este valor casi 4 veces las recomendadas en el manual del fabricante. Estos sólidos en suspensión pueden generar abrasión causando un desgaste prematuro y excesivo de los componentes internos de la bomba.

La “causa ambiental, partículas sólidas” se acoge como posible causa raíz de la falla del componente bomba de agua.

- VI. Causa habilidades técnicas: para trabajar con bombas de agua, el área técnica a cargo del mantenimiento cuenta con una serie de habilidades técnicas que le permiten, comprender, mantener, reparar e instalar eficientemente este tipo de equipos. Algunas de las habilidades serían las siguientes:

- **Conocimiento de principios de ingeniería:** entender los principios básicos de cómo funcionan las bombas de agua, incluyendo conceptos de flujo, presión, succión, y como estos se relacionan con el rendimiento de la bomba.
- **Habilidades de diagnóstico:** ser capaces de identificar y diagnosticar problemas comunes con las bombas de agua, como fugas, obstrucciones, desgaste de componentes, problemas eléctricos entre otros.
- **Conocimiento del sistema hidráulico:** comprender como se integran las bombas de agua en sistemas más grandes, incluyendo la comprensión de las tuberías, válvulas, accesorios y otros componentes relacionados.
- **Habilidades de mantenimiento preventivo:** ser capaz de llevar a cabo el mantenimiento regular de las bombas de agua, incluyendo la lubricación, limpieza, ajustes y la sustitución del componente.
- **Habilidades de instalación:** ser capaz de instalar nuevas bombas de agua correctamente, incluyendo la alineación adecuada, la conexión de las tuberías, instalación de periféricos necesarios y la puesta en marcha inicial.
- **Conocimiento de seguridad:** tener un buen entendimiento de las prácticas de seguridad relacionadas con el trabajo en bombas de agua, incluyendo el manejo seguro de herramientas y equipos, la protección contra riesgos eléctricos, y la prevención de lesiones personales durante la operación y mantenimiento de las bombas.

Si bien, dentro de las pautas de mantenimiento de la empresa contratista no existen intervenciones mayores, ya sea, cambio de componentes internos de la bomba, armado y desarmado de esta; Epiroc se caracteriza por ser una empresa en busca de mejora constante capacitando a sus técnicos en cursos específicos respecto al conocimiento del equipo en general. Respecto a la bomba de agua, el área técnica cuenta con toda la documentación necesaria para realizar las intervenciones del componente, desde manual de usuario, manual de partes, funcionamiento, ficha técnica, entre otros.

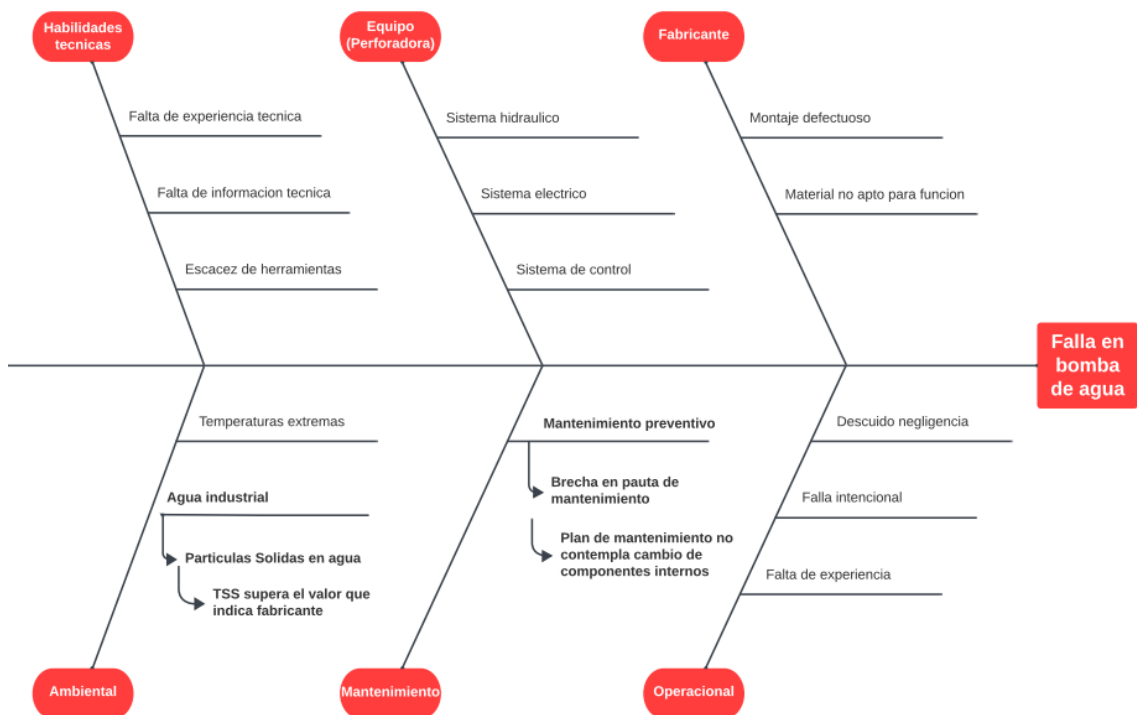
Se descarta la causa “habilidades técnicas” debido a que no existe intervención mayor por parte del área técnica sobre el componente en cuestión.

CAPÍTULO 3: PROPUESTAS DE MEJORA

3. PROPUESTAS DE MEJORA

Con el fin de plantear propuestas de mejoras y dar fin al problema raíz expuesto en los capítulos anteriores, se debe analizar cuáles fueron las principales causas obtenidas tras el análisis.

El análisis de causa raíz revelo dos factores clave que contribuyeron a la falla de la bomba de agua. Por un lado, la presencia de sedimentos en el agua, detectados mediante un análisis detallado, puede provocar un desgaste prematuro de los componentes internos de la bomba. Por otro lado, se identificó una brecha en la pauta de mantenimiento de la bomba, lo que significa que no se están realizando inspecciones y limpiezas periódicas de manera adecuada. Estos dos problemas combinados, aumentan la probabilidad de fallo de la bomba y disminuyen su vida útil. Para abordar este desafío y brindar propuestas de mejora continua que aumenten la confiabilidad del elemento en cuestión, será fundamental implementar soluciones que aborden tanto la calidad del agua como la gestión del mantenimiento.



Fuente: Autor.

Diagrama 3-1 “Diagrama Ishikawa causas probables”

Como se mencionó anteriormente uno de los puntos a trabajar contemplan abordar la calidad del agua industrial disponible en la mina. En teoría este punto es viable, ya que, al cambiar a un agua más pura, que no contenga sedimentos aumentaría considerablemente la confiabilidad de la bomba de agua, esto debido a que trabajaría dentro de los parámetros permisibles y recomendados por fabricante. Sin embargo, en la práctica cambiar de agua en el ámbito minero no es viable en lo absoluto por las siguientes razones:

- I. **Disponibilidad:** La minería suele ubicarse en áreas donde el acceso al agua puede ser limitado, muchas veces depende de las condiciones climáticas y de tener inviernos abundantes para subsistir, por lo que encontrar una nueva fuente de agua que sea lo suficientemente abundante y accesible puede ser un desafío.
- II. **Infraestructura:** La infraestructura necesaria para transportar grandes volúmenes de agua hasta el yacimiento minero puede ser costosa de construir y mantener. Esto incluye tuberías, bombas y sistemas de almacenamiento.
- III. **Impacto ambiental:** Cambiar la fuente de agua puede tener impactos ambientales significativos, podría afectar ecosistemas locales, especialmente si se extrae de ríos, lagos, entre otros.
- IV. **Conflictos de interés:** En algunas regiones, el agua es un recurso disputado entre diferentes usuarios, como agricultores, comunidades locales y la industria. Cambiar la fuente de agua de la minería podría provocar conflictos con otros usuarios.
- V. **Costo:** El cambio de fuente de agua puede implicar costos adicionales significativos para la minería. Esto incluye no solo el costo de adquirir y transportar el agua, sino también el costo de permisos y regulaciones asociadas.

Debido a las razones expuestas anteriormente, se determina que para aumentar la confiabilidad del componente bomba de agua se debe trabajar en soluciones respecto a la gestión del mantenimiento.

3.1. PROPUESTA “A” INSPECCION SEMANAL

La propuesta de mejora “Inspección semanal” se centra en la introducción de un programa de monitoreo preventivo basado en una pauta detallada de inspección que se

llevaría a cabo semanalmente. Si bien, esta pauta de inspección ya se encuentra en uso en Epiroc, carece de puntos específicos dedicados al control y monitoreo del componente en cuestión. Para abordar esta deficiencia, se han agregado cuatro puntos específicos relacionados con la bomba de agua. Esta estrategia tiene como objetivo principal la detección temprana de posibles fallas o irregularidades en el funcionamiento de la bomba de agua, lo que permitiría intervenir antes de que los problemas se conviertan en complicaciones significativas que requieran tiempos prolongados de reparación. Además de mejorar la fiabilidad del equipo, este enfoque también contribuiría a la reducción del tiempo de inactividad no planificado (imprevisto), optimizando así la eficiencia operativa y los costos asociados con el mantenimiento correctivo.

Tabla 3-1 Inspección semanal.

Item	Inspeccion General	Estado				Comentarios
		Bueno	Regular	Malo	Corregido	
1	Inspeccionar estado de escaleras de acceso LC y LNC					
2	Inspeccionar estado de peldaños flotantes LC y LNC					
3	Inspeccionar estado de plataformas en general					
4	Inspeccionar estado de enfriadores de aceite					
5	Inspeccionar estado de anclajes de enfriadores					
6	Verificar sistema de iluminacion en interior sala de maquinas					
7	Verificar funcionamiento del presurizador sala de maquinas					
8	Verificar y limpiar filtros strainer en bomba de agua					
9	Chequear nivel de aceite bomba de agua					
10	Inspeccionar bomba de agua por fuga de aceite					
11	Inspeccionar bomba de agua por fuga de agua					
12	Inspeccionar estado de bomba de agua (modulacion)					
13	Inspeccionar estado y funcionamiento de sistema artico					
14	Inspeccionar nivel de grasa en deposito y funcionamiento de bomba					
15	Inspeccionar estado estructural mesa de perforacion					
16	Inspeccionar tension de cables de avance					
17	Inspeccionar estado de porta filtros de aire					
18	Inspeccionar estado de barandas					
19	Inspeccionar estado de cadenas					
20	Inspeccionar estado de rodillos					
21	Inspeccionar estado de bastidores					
22	Inspeccionar bases de cilindros nivelacion					
23	Verificar estado de sistema iluminacion exterior					
24	Chequear funcionamiento de bocinas de advertencia					
25	Chequear funcionamiento de bocinas de propulsion					
26	Verificar funcionamiento y sincronizacion de enrolla cable					
27	Inspeccionar funcionamiento de paradas de emergencia					
28	Chequear posibles fugas de lubricante					
29	Chequear niveles (hidraulico, compresor, pto)					
30	Verificar alineamiento de cabezal de rotacion					
31	Verificar funcionamiento de rod support					
32	Verificar funcionamiento de llave caiman					
33	Realizar aseo a plataforma de perforacion					
34	Verificar estado de correa A/C					
35	Verificar estado de vidrios y limpia parabrisas					
36	Verificar funcionamiento de calefaccion y aire acondicionado					
37	Verificar funcionamiento tactil pantalla RCS5					
38	Verificar desacelerador superior de cabezal					
39	Verificar bitacora, retirar reporte y firmar					

Fuente: Autor.

Los puntos anteriormente agregados a la pauta de inspección semanal corresponden a puntos especificados por el fabricante del componente, el cual indica que diariamente se debe realizar: limpieza de filtros, chequear el nivel de aceite, verificar fugas de aceite, verificar fugas de agua.

PREVENTATIVE MAINTENANCE CHECK-LIST						
Check	Daily	Weekly	50 hrs.	500 hrs.*	1500 hrs.**	3000 hrs.**
Clean Filters	x					
Oil Level/Quality	x					
Oil Leaks	x					
Water Leaks	x					
Belts, Pulley		x				
Plumbing		x				
Initial Oil Change			x			
Oil Change				x		
Seal Change					x	
Valve Change						x
Accessories					x	

Fuente: Autor.

Figura 3-1 “Mantenimiento preventivo diario.”

A pesar de que se indica que la realización de dichos puntos debe ser diariamente, en la práctica no resulta conveniente ya que, detener el equipo para realizar las actividades repercutiría en la disponibilidad de la perforadora quedando fuera de servicio al menos una vez al día. Para no impactar la disponibilidad del equipo es que se propone incluir dichos puntos en la pauta de inspección semanal, dicha pauta contempla la inspección del equipo en general y los tiempos de detención corren por parte de la empresa mandante ya que corresponden a actividades de mantenimiento planificados sin generar cobros por indisponibilidad.

3.2. PROPUESTA “B” MODIFICACION EN PAUTA DE MANTENIMIENTO

La propuesta de mejora “B” nace del hallazgo en la pauta de mantenimiento de la perforadora Pit Viper 351-E. Como se mencionó anteriormente la pauta de mantenimiento cuenta con puntos específicos para cada componente y el equipo en general, sin embargo, al analizar la pauta en el contexto del análisis causa raíz expuesto anteriormente se logra identificar una brecha significativa la cual representa potencialmente la falla prematura de la bomba de agua. Dentro de la pauta de mantenimiento sugerida por el fabricante de las bombas se indica una serie de puntos de acuerdo con horas establecidas de funcionamiento, dentro de este plan se sugiere que a las 1.500 horas se realice cambio de

sellos y cambio de accesorios entre los cuales destacan los filtros de succión o también conocidos como filtros strainer.

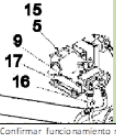
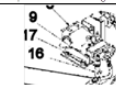
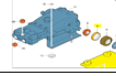

PREVENTATIVE MAINTENANCE CHECK-LIST						
Check	Daily	Weekly	50 hrs.	500 hrs.*	1500 hrs.**	3000 hrs.**
Clean Filters	x					
Oil Level/Quality	x					
Oil Leaks	x					
Water Leaks	x					
Belts, Pulley		x				
Plumbing		x				
Initial Oil Change			x			
Oil Change				x		
Seal Change					x	
Valve Change						x
Accessories					x	

Fuente: Autor.

Figura 3-2 “Mantenimiento preventivo 1.500 horas”

Al comparar la pauta de mantenimiento sugerida por fabricante con la ejecutada por la empresa a cargo del mantenimiento del componente se detecta que ambos puntos señalados anteriormente están ausentes careciendo de mantenimiento. Como propuesta de mejora se plantea la idea de agregar ambos puntos a la pauta de mantenimiento ya existente por parte de la empresa contratista, las modificaciones se expresan en la pauta de mantenimiento señalada a continuación.

Tabla 3-2 Pauta de mantenimiento propuesta.

ACTIVIDAD	LIMITES ACEPTABLES, RECOMENDACIONES	BUENO	MALO	COMENTARIOS ADICIONALES	P1: REP. EN ESTA DETENCION/ P2: PROGR. EN PROX. DETENCION	NOMBRE DEL TECNICO
Comprobar sistema de inyección agua	Visualizar salida de agua por el triángulo					
Tomar muestra de aceite bomba inyección agua	Retiro desde bomba de agua. No tomar muestras del fondo del componente. No tomar muestra con aceites decantados en el componente. No exponer la sonda ni el bombín al polvo ambiental.					
Cambio de aceite bomba de agua	Reemplazo de aceite					
Sistema inyección de agua						
Cambio de filtros de succión (strainer 56775760)						
Limpieza sensor de nivel estanque	Confirmar funcionamiento mecánico de sensor dentro de estanque agua, aguja analoga debe indicar mismo valor de pantalla.					
Verificar estado de válvula check de descarga 3/4"	Realizar revisión de válvula de descarga, esta debe impedir el paso del aire hacia el cuerpo de la bomba de agua.					
Cambiar válvulas check sistema inyección (succión 1" y descarga 3/4") Nota: No botar válvulas cambiadas, entregar a jefe de turno						
Revisión de estado de cadena acoplamiento bomba de agua. Se debe retirar guarda de protección de bomba, luego visualizar estado de cadena, seguro de cadena y chaveta de bomba de agua.						
Sistema inyección de agua	Ajustar 1 gata cada 60 segundos					
Realizar cambio de sellos (Seal kit 3658110602)						

Fuente: Autor.

La pauta contempla dos puntos nuevos, el primero referente a los filtros de succión o filtros strainer, encargados de filtrar partículas nocivas para la bomba y el segundo el cambio de componentes internos de la bomba tales como sellos. La finalidad de agregar ambas actividades a la pauta de mantenimiento es aumentar la confiabilidad del componente apegando la pauta de mantenimiento sugerida por el fabricante a la pauta real de mantenimiento ejecutada por la empresa a cargo.

3.3. EVALUACIÓN DE PROPUESTAS

Al evaluar propuestas de mejora continua, es fundamental adoptar un enfoque integral que abarque una amplia gama de criterios. Estos criterios actúan como guías para determinar viabilidad y efectividad de cada propuesta, permitiendo a las organizaciones tomar decisiones fundamentadas y dirigidas hacia la mejora constante de sus procesos y resultados. La consideración cuidadosa de estos criterios no solo ayuda a garantizar el éxito de las iniciativas de mejora, sino que también fomenta una cultura de mejora continua arraigada en la organización.

Uno de los criterios clave para tener en cuenta es el impacto potencial de la propuesta en la eficiencia operativa, esto implica evaluar si la mejora propuesta tiene el

potencial de optimizar los procesos existentes. Otro aspecto crucial por considerar es la factibilidad de implementar la propuesta, esto implica analizar si la organización cuenta con los recursos necesarios, incluyendo personal capacitado, herramientas adecuadas y presupuesto disponible, para llevar a cabo la propuesta de manera efectiva y oportuna. Además, es importante evaluar el grado de alineación de la propuesta con los objetivos estratégicos de la organización, asegurando que contribuya de manera significativa a la consecución de los objetivos a largo plazo y se ajuste a la visión y misión de la empresa. Por otra parte, también es esencial considerar el impacto en la seguridad, la reducción de desperdicio, el análisis de costos y beneficios, y el nivel de aceptación por parte del equipo. Al abordar cada uno de estos criterios, la organización puede evaluar de manera efectiva las propuestas de mejora continua y tomar decisiones informadas que impulsen el éxito y sostenibilidad a largo plazo.

3.3.1. Evaluación de propuesta “A”. Inspección semanal

Dentro de los puntos a considerar al momento de evaluar la propuesta “A”, se debe valorar la repercusión que genera en los tiempos planificados de inspección el agregar 4 puntos nuevos específicos relacionados con el componente bomba de agua.

Tabla 3-3 Pauta de mantenimiento propuesta.

Item	Inspeccion General	Estado				Comentarios
		Bueno	Regular	Malo	Corregido	
8	Verificar y limpiar filtros strainer en bomba de agua					
9	Chequear nivel de aceite bomba de agua					
10	Inspeccionar bomba de agua por fuga de aceite					
11	Inspeccionar bomba de agua por fuga de agua					

Fuente: Autor.

Durante la inspección semanal del equipo de perforación se asigna un tiempo de 3,0 horas maquina y 3,0 horas por técnico abarcando un total de 9 horas hombre. Los tiempos medios de realización de la pauta de inspección en su totalidad redondean las 2,5 horas dando un margen de 0,5 horas para realizar las actividades anteriormente mencionadas evitando que el equipo quede fuera de servicio y que se realice un cobro respectivo por el tiempo. El impacto de añadir las 4 actividades específicas en el tiempo asignado para la inspección semanal del equipo es mínimo, al ser actividades de inspección visuales en gran parte no conlleva a grandes tiempos de trabajo.

Uno de los grandes beneficios de realizar esta inspección y añadir estos puntos es identificar brechas oportunas en el componente, evitando situaciones como las expuestas en la siguiente figura.



Fuente: Autor.

Figura 3-3 “Filtro strainer línea de succión”

La imagen muestra el estado en que se encuentra actualmente el filtro strainer de la bomba de agua, el filtro está ubicado en la línea de succión del componente evidenciando la incapacidad de filtrar partículas nocivas para la bomba, probablemente generando daño prematuro de los sellos de agua.

Para evaluar el impacto económico y la viabilidad de esta propuesta, se deben considerar los siguientes puntos:

- La propuesta de inspección no incluye el cambio de filtro strainer.
- La propuesta de inspección no incluye cambio de aceite.

A pesar de los puntos mencionados anteriormente, la pauta incluye 4 criterios:

Estado			
Bueno	Regular	Malo	Corregido

Fuente: Autor.

Figura 3-4 “Criterios pauta de inspección”

Durante la inspección existe la posibilidad de que el técnico determine mediante su experiencia y expertiz, la necesidad inmediata del cambio de filtro strainer, debido a un estado excesivo de contaminación o rotura de la malla de filtración. Debido a esto es que se asume el costo de un cambio de filtro por trimestre. Al mismo tiempo, existe la posibilidad de que el nivel de aceite del componente se encuentre bajo lo permisible obligando a generar el relleno correspondiente, se asume el costo de reposición de aceite.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente se expone la siguiente tabla que grafica los costos de implementar la propuesta de mejora “A”.

Tabla 3-4 Propuesta de mejora “A”

PROPUESTA DE MEJORA "A"		
ACTIVIDAD	DESCRIPCION	COSTO
1	Verificar y limpiar filtros strainer bomba de agua	\$ 249
2	Chequear nivel de aceite bomba de agua	\$ 86
3	H-H de un tecnico para ejecutar tareas	\$ 65
		\$ 400 [USD]

Fuente: Autor.

Los costos totales de la propuesta “A” incluyen los cambios de bomba anuales de acuerdo con TBO, se obtiene la siguiente tabla:

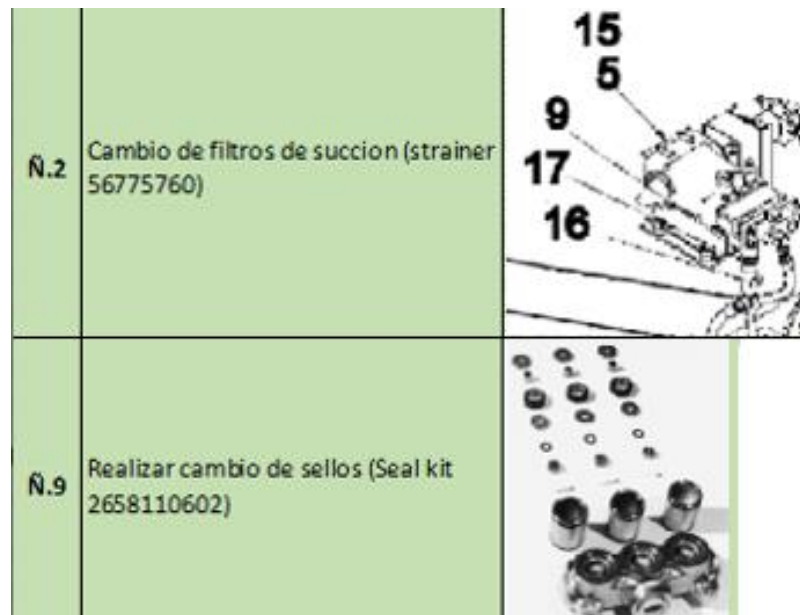
Tabla 3-5 Propuesta de mejora “A”

PROPUESTA DE MEJORA "A"	COSTO	MONEDA
Verificar y limpiar filtros strainer bomba de agua	\$ 249	[USD]
Chequear nivel de aceite bomba de agua	\$ 86	[USD]
H-H de un tecnico para ejecutar tareas	\$ 65	[USD]
Cambio de bombas de agua	\$ 45.039	[USD]
TOTAL	\$ 45.438	[USD]
Costos totales sin propuesta	\$ 207.048	[USD]
BENEFICIO	\$ 161.610	[USD]

Fuente: Autor.

3.3.2. Evaluación de propuesta “B”. Modificación en pauta de mantenimiento

Producto del Análisis causa raíz expuesto en el capítulo anterior, se identifica una brecha significativa, dicha brecha representa la discordancia entre el plan de mantenimiento asignado por fabricante y el plan de mantenimiento ejecutado. Para abordar este tema, se plantea la propuesta de mejora “B”, la cual incluye dos puntos específicos y de suma importancia a la hora de realizar mantenimiento al componente bomba de agua.



Fuente: Autor.

Figura 3-5 “Puntos añadidos en pauta de mantenimiento”

Los puntos anteriormente expuestos representan actividades a ejecutar en la pauta de mantenimiento de la perforadora de acuerdo con la MP de 1.500 horas. Al ser trabajos planificados previamente no tienen un cobro asociado a indisponibilidad del equipo.

La siguiente tabla representa los costos anuales asociados a implementar la propuesta de mejora “B”, incluye los cambios de bombas de acuerdo con TBO de 2.000 horas.

Tabla 3-6 Propuesta de mejora "B"

PROPUESTA DE MEJORA "B"	COSTO	MONEDA
Cambio de filtro strainer	\$ 249	[USD]
Cambio de sellos internos	\$ 1.427	[USD]
H-H tecnico que ejecuta tarea	\$ 261	[USD]
Cambio de bombas de agua	\$ 44.885	[USD]
TOTAL	\$ 46.821	[USD]
Costos totales sin propuesta	\$ 206.627	[USD]
BENEFICIO	\$159.805	[USD]

Fuente: Autor.

3.3.3. Evaluación de propuesta "A y B"

Para asegurar un correcto funcionamiento del componente bomba de agua, resguardando su confiabilidad es que se plantea la idea de realizar ambas propuestas de mejora en simultaneo, aumentando el mantenimiento preventivo apegándose al mantenimiento planteado por fabricante. Si bien, ambas propuestas demuestran un beneficio económico positivo, no existe certeza absoluta sobre cómo será su comportamiento. Se cree que cualquier labor que se realice conllevará beneficios tanto económicos, productivos y en el ámbito de la seguridad.

Tabla 3-7 Propuesta de mejora "A y B"

PROPUESTA DE MEJORA "A y B"	COSTO	MONEDA
PROPUESTA DE MEJORA "A"	\$ 45.285	[USD]
PROPUESTA DE MEJORA "B"	\$ 46.821	[USD]
TOTAL	\$ 92.107	[USD]
Costos totales sin propuesta	\$ 206.627	[USD]
BENEFICIO	\$ 114.520	[USD]

Fuente: Autor.

Ambas propuestas evaluadas anteriormente exponen un escenario ideal en donde se cambian 4 bombas anuales relacionadas directamente al tiempo asignado de funcionamiento el cual contempla 2.000 hrs de operación para su posterior reemplazo (TBO 2.000hrs). Se plantea la idea de evaluar tras realizar las mejoras propuestas la posibilidad de estudiar el comportamiento de las bombas y reconsiderar el tiempo óptimo de funcionamiento evaluando la opción de extender su vida útil a 3.000 hrs generando una

optimización de su uso y disminuyendo el periodo de reemplazo a 3 bombas anuales, lo que permite un beneficio económico cercano a los 11.221 [USD].

3.3.4. Mejora medioambiental

La realización de las propuestas de mejoras anteriormente mencionadas conlleva a un beneficio enfocado al ámbito ambiental, la contaminación generada por la industria minera a través del descarte de componentes mecánicos es un problema ambiental grave que afecta a numerosas regiones en todo el mundo. La actividad minera, al utilizar maquinaria pesada y equipos especializados, produce una gran cantidad de desechos nocivos los cuales quedan expuestos sin necesariamente contar con un plan de reutilización, o forma correcta de ser desechados. Las propuestas expuestas suponen una disminución considerable en el recambio del componente bomba de agua, disminuyendo los costos asociados a dicho reemplazo, al mismo tiempo contribuyen a mantener nuestro ecosistema libre de contaminación, evitando visualizar escenarios como los expuestos en la siguiente imagen.



Fuente: Fotografía tomada en terreno.

Figura 3-6 “Bombas de agua reemplazadas”

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con lo planteado durante el presente trabajo, en donde el proceso de aplicación del Análisis Causa Raíz (ACR) ha permitido una comprensión profunda de los desafíos enfrentados por el sistema crítico de la perforadora Pit Viper 351, se ha evidenciado un enfoque integral y efectivo para abordar los desafíos en el rendimiento de este equipo. A través de la descripción detallada de sus sistemas y subsistemas, así como del contexto operacional en que se desenvuelve, se ha podido identificar la problemática que afecta su rendimiento.

Mediante el riguroso estudio de las causas subyacentes de la falla crónica del componente, se ha obtenido una visión clara de los puntos de intervención necesarios para evitar la recurrencia del problema. Las propuestas de mejora validadas han sido cuantificadas en términos de tiempos y costos de reparación, lo que permite una evaluación exhaustiva de su viabilidad económica y beneficios potenciales. En este sentido el ACR no solo ofrece soluciones concretas y efectivas, sino que también proporciona una base sólida para la implementación de mejoras continuas en el sistema, garantizando así su óptimo funcionamiento a largo plazo.

La implementación de mejoras a los planes de mantenimiento no solo conlleva un beneficio económico, sino también, un beneficio en el ámbito de la seguridad operacional y medioambiental. Al exponer y abordar las causas raíz de la falla, se pueden identificar y corregir situaciones que representen riesgos para la seguridad del personal y para el entorno ambiental. Además, al optimizar los procesos de mantenimiento, se reducen las probabilidades de incidentes y se promueve una operación más segura y sostenible a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE LA INFORMACIÓN

Apuntes “Estrategias de mantenimiento” Ingeniería en confiabilidad II.

CAT PUMPS. Data Sheet Cat Pumps 2520, Water pump. [en PDF]

CAT PUMPS. Disassembly manual Cat Pumps 2520. [en PDF]

CAT PUMPS. Pistón Pump Service Manual. [en PDF]
<https://www.catpumps.com/sites/default/files/products/pdfs/PstnSvc.pdf>

CODELCO ANDINA. Pronóstico meteorológico Codelco división Andina. [en línea] <https://deve.codelco.cl/>. 2023.

CODELCO ANDINA. Reporte pluviométrico Codelco división Andina. [en línea] <https://deve.codelco.cl/>. 2023.

Organización Internacional de Normalización. Norma ISO 55000:2014 Gestión de activos — Aspectos generales, principios y terminología. Artículo 8. (2014)

PARRA Carlos. Técnica de Jerarquización de Activos MCCR: Matriz de Criticidad Cualitativa de Riesgo. UTFSM. 2021.

SGS CHILE. Informe de análisis de agua industrial Laboratorio Ambiental. [en línea] <https://www.sgs.com/es-cl/services/estudios>

ANEXOS

ANEXO 1: DETALLE COSTO DE PRODUCCIÓN POR IMPREVISTO

Detalle de costo de produccion por imprevisto		
Valor metro perforado	\$ 46	[USD]
Metros por pozo	18	[m]
Tiempo por pozo	16	[min]
Duracion de imprevisto	146	[min]
Metros perforados durante MTTR	164	[m]
Costo por imprevisto	\$ 7.563	[USD]

ANEXO 2. INFORME ANÁLISIS DE AGUA**Informe de Análisis: ES23-31492**

ANÁLISIS	UNIDAD	LD	MUESTRA
			MUESTRAS DESDE CAMION ALJIBE
Aluminio	mg/L	0.04	3.29
Antimonio	mg/L	0.01	<0.01
Arsénico	mg/L	0.01	<0.01
Bario	mg/L	0.01	<0.01
Berilio	mg/L	0.01	<0.01
Bismuto	mg/L	0.008	<0.008
Boro	mg/L	0.01	<0.01
Cadmio	mg/L	0.01	<0.01
Calcio	mg/L	0.01	34.25
Cinc	mg/L	0.01	0.26
Cobalto	mg/L	0.01	<0.01
Cobre	mg/L	0.01	5.53
Cromo Total	mg/L	0.01	<0.01
Dureza Total (como CaCO3)	mg/L	0.05	118.10
Estaño	mg/L	0.01	<0.01
Estroncio	mg/L	0.01	0.12
Hierro	mg/L	0.01	4.07
Litio	mg/L	0.01	<0.01
Magnesio	mg/L	0.01	7.88
Manganeso	mg/L	0.01	1.18
Molibdeno	mg/L	0.01	<0.01
Níquel	mg/L	0.01	<0.01
Plata	mg/L	0.01	<0.01
Plomo	mg/L	0.01	<0.01
Potasio	mg/L	0.01	0.21
Selenio	mg/L	0.01	<0.01
Silicio	mg/L	0.1	2.2
Sodio	mg/L	0.01	2.90
Talio	mg/L	0.01	<0.01
Tasa de Corrosión en Líquidos	MM/AÑO	6.350	<6.35
Titanio	mg/L	0.01	<0.01
Uranio	mg/L	1	<1
Vanadio	mg/L	0.01	<0.01

Fuente: Laboratorio ambiental SGS Chile.

ANEXO 3. ESPECIFICACIONES BOMBA DE AGUA

SPECIFICATIONS	U.S. Measure	Metric Measure
Flow	25 gpm	94.6 lpm
Pump Pressure Range	100–800 psi	6.9–55 bar
Pump RPM*	772 rpm	772 rpm
Inlet Pressure Range	-8.5–40 psi	-0.6–2.8 bar
Max. Liquid Temp. (NBR) (2520)	160° F	71° C
Alternative seals available for higher temperatures up to 180° F		
Max. Liquid Temp. (2520C)	210° F	98° C
Bore	1.490"	38 mm
Stroke	1.417"	36 mm
Crankcase Capacity	84 oz	2.5 l
Inlet Ports (1)	1¼" NPT(F)	1¼" NPT(F)
Flush Ports (2) (2520C)	¼" NPT(F)	¼" NPT(F)
Discharge Ports (3)	1" NPT(F)	1" NPT(F)
Shaft Diameter	1.181"	30 mm
Pulley Mounting	Either Side	Either Side
Weight	54 lbs	24.5 kg
Dimensions (2520, 2525)	21.93 x 15.04 x 7.8"	557 x 382 x 198 mm

Fuente: Cat Pumps.