



**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**IMPLEMENTACIÓN DE PROPUESTA TECNOLÓGICA AL PROCESO DE  
MONITOREO DE CONDICIONES PARA LA FLOTA DE CAMIONES DE  
EXTRACCIÓN DE MINERA LOS PELAMBRES**

*PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN  
INGENIERÍA DE NEGOCIOS CON TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN*

**WILIBALDO JOEL LAGOS BENAVIDES**

PROFESOR GUÍA:

PATRICIO WOLFF ROJAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

EZEQUIEL MUÑOZ KRSULOVIC

FELIPE VERA CID

SANTIAGO DE CHILE

2023

## RESUMEN EJECUTIVO

Durante la investigación de este proyecto de grado se logra identificar y dar una solución, de índole tecnológica, a la problemática que existe dentro de la gerencia de mantenimiento mina de la empresa minera los Pelambres, en específico en el área de mantenimiento de camiones de extracción. La problemática radica en la baja disponibilidad física real de los camiones de extracción, con afectación de un -0,6% a contar de junio hasta diciembre 2021 versus el 85% presupuestado y como ésta afecta negativamente el tonelaje anual movido de la mina en 2,5 millones de toneladas o un 1,7%.

Actualmente, minera los Pelambres para dar cumplimiento a su programa de transformación digital, refuerza el uso de herramientas digitales de la industria 4.0 a través de la implementación de áreas tecnológicas de soporte TI que apoyan a la operación y al mantenimiento de equipos mina. Bajo este contexto, el proyecto tiene el objetivo de aumentar la disponibilidad de los camiones de extracción, eliminando 1 falla catastrófica de motores diésel marca Cummins, modelo QSK60 al año.

Para ello, durante el desarrollo del proyecto se logra implementar un programa que usa algoritmos de predicción de fallas, basado en herramientas de machine learning, que de soporte al actual proceso de monitoreo de análisis de aceite, mostrando el estado actual del motor y predecir que camión tendrá una mayor probabilidad de falla, mediante la implementación del indicador RUL (remaining useful life). Las variables de entrada que nutren el programa serán de presión, temperatura y fallas asociadas de los motores diésel, las cuales son obtenidas del actual sistema de monitoreo ya instalado, llamado SPECTO. Si bien los beneficios finales todavía se encuentran en proceso de análisis, durante el desarrollo del proyecto se logran determinar 2 camiones de extracción con una alta probabilidad de falla en su motor diésel, el cual fueron el 105 y el 107, los cuales se toma la decisión de adelantar su mantenimiento, bajándolos a taller y realizar su pauta de mantención y de toma de muestras. La probabilidad de que 1 de estos motores haya fallado de forma catastrófica, hubiese generado una afectación en costo de 1,2 millones de dólares y de disponibilidad de 0,2% producto del tiempo fuera de servicio del equipo (promedio 3 meses).

# TABLA DE CONTENIDO

<b>CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO.....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes de la Industria.....	1
1.2 Análisis PEST.....	1
1.3 Descripción General de la Empresa.....	10
1.3.1 Pilares y Objetivos Estratégicos.....	11
1.3.2 Proceso Productivo.....	11
1.3.3 Clientes y Porcentaje de Participación.....	12
1.3.4 Competidores.....	13
1.4 Acerca del problema y su justificación.....	13
1.5 Objetivos y Resultados Esperados del Proyecto.....	16
1.5.1 Objetivo General.....	16
1.5.2 Objetivos Específicos.....	16
1.5.3 Resultados Esperados.....	17
1.6 Alcance.....	18
1.7 Riesgos Potenciales.....	19
<b>CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>20</b>
2.1 Industria Minera.....	20
2.1.1 Tipos de Extracción.....	20
2.2 Equipos Utilizados en la Minería.....	21
2.3 Mantenimiento.....	23
2.3.1) Tipos de mantenimiento.....	24
2.4 Modelo de Predicción de Fallas.....	26
2.5 Machine Learning.....	27
2.5.1) Tipos de aprendizaje automático.....	29
2.5.2) Remaining Useful Life (RUL).....	32
2.6 Programa de monitoreo SPECTO.....	34
2.7 Metodología de trabajo.....	34
2.7.1) Metodología para el diseño de proceso.....	35

<b>CAPITULO 3: PLANTEAMIENTO ESTRATÉGICO</b>	
<b>Y ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL.....</b>	<b>37</b>
3.1 Posicionamiento Estratégico.....	37
3.2 Modelo de Negocios.....	37
3.3 Diagnóstico de la Situación Actual.....	39
3.3.1 Problema(s) Identificado(s) / Oportunidad(es) identificada(s).....	40
3.3.2 Arquitectura de Procesos AS IS.....	47
3.3.3 Modelamiento Detallado de Procesos AS IS.....	49
3.4 Cuantificación del Problema u Oportunidad.....	50
<b>CAPITULO 4: PROPUESTA DE DISEÑO DE PROCESOS.....</b>	<b>51</b>
4.1 Direcciones de cambio y alcances.....	51
4.1.1 Procesos Clave.....	51
4.1.2 Variables de diseño.....	53
4.2 Propuesta de solución.....	57
4.2.1 Modelamiento detallado de procesos TO BE (BPMN).....	58
4.2.2 Diseño de lógica de negocios.....	61
<b>CAPITULO 5: PROPUESTA DE APOYO TECNOLÓGICO.....</b>	<b>65</b>
5.1 Arquitectura tecnológica.....	65
5.2 Prototipo Funcional Desarrollado.....	68
5.3 Visualización de los resultados.....	71
<b>CAPITULO 6: PROPUESTA IMPLEMENTACIÓN.....</b>	<b>76</b>
6.1 Descripción General.....	76
6.2 Procesos soportados.....	77
6.3 Pantallas del dashboard.....	78
6.4 Resultados de la implementación.....	80
6.5 Usabilidad del dashboard.....	81
6.6 Gestión del cambio.....	82
<b>CAPITULO 7: EVALUACION ECONÓMICA.....</b>	<b>88</b>
<b>CAPITULO 8: CONCLUSIONES.....</b>	<b>90</b>
<b>CAPITULO 9: BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>94</b>

# **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO**

## **1.1 Antecedentes de la Industria**

Minera Los Pelambres, principal empresa del grupo minero Antofagasta Minerals (AMSA), opera dentro de la industria minera de producción de cobre y derivados en Chile.

Según lo que indica el consejo minero, Chile consolidó su posición como segundo país productor de cobre en el mundo a mediados del siglo XX, después de Estados Unidos, y posteriormente, en la década de los ochenta, pasó a ser primer productor mundial. Es así como el texto señala que la industria minera Chilena, en particular la de cobre, es la mayor en producción y exportación en el mundo llegando a ser el sector más activo en el desarrollo de la economía nacional debido a los montos que manejan los inversionistas y los niveles de producción que se alcanzan año tras año. (Minero, 2019)

Los principales grupos que componen el mercado minero en Chile son Anglo American, BHP Billiton, Codelco, Antofagasta Minerals y Collahuasi. El porcentaje de participación en el mercado se mide por la cantidad de cobre producido por empresa.

Para entregar más antecedentes de la industria se muestra el siguiente análisis PEST de la industria de producción de cobre. Según la página web ingenio empresa (Betancourt, 2018) el análisis PEST considera cuales son los factores, tanto negativos como positivos que afectan al negocio. Los siguientes factores externos que se consideran son: político, económico, sociedad y tecnología.

## **1.2 Análisis PEST**

### **a) Político**

Los factores políticos juegan un rol importante a la hora de tomar decisiones para generar inversiones capitalizables dentro de la minería. Por ejemplo, según el portal de minería chilena, mch.cl, indica que temas como por ejemplo el “estallido social” ocurrido en

octubre del 2019 o la creación de un nuevo proceso constituyente generan mucha incertidumbre en el sector, lo que afecta directamente en la caída de la inversión para nuevos proyectos mineros, afectando el índice de empleabilidad del sector (mch.cl, 2021).

Por otro lado, según lo indicado por el portal de minería, mch.cl con un análisis realizado por la empresa GEM Mining Consulting, al incluirse nuevas cláusulas a una nueva constitución chilena, como la exigencia de terrenos protegidos que no podrán explotarse, derechos preferentes a comunidades indígenas, entre otros, generan incerteza jurídica, provocando incertidumbre en el sector de la inversión minera. (Chilena, 2022)

Incorporado a los factores antes mencionados, cabe destacar los efectos que tuvo la pandemia a nivel mundial y en donde el sector minero chileno se vio afectado desde diferentes puntos de vista. En el año 2022 y luego de un arduo trabajo para la recuperación económica producida por la pandemia del COVID-19, la industria minera en febrero de 2022 tuvo una disminución de 0,9% del precio de venta del cobre fino pagable, ubicando el precio de la libra en cUS\$4,5, según lo informo en su momento la Comisión Chilena del Cobre, lo que se evidencia como un impacto negativo en las bolsas de valores y un efecto directo en la cotización del cobre. (Colchico, 2022)

Otro de los aspectos políticos que pueden afectar significativamente la industria del cobre en Chile es el Brexit y la modificación de los acuerdos comerciales con el Reino Unido. La salida del Reino Unido de la Unión Europea supone o conlleva la modernización del Acuerdo de Asociación comercial existente con Chile, el cual busca mantener las gestiones comerciales bajo condiciones similares a las pactadas con el macro grupo. (Cámara de Comercio de Santiago, 2022)

## **b) Económico**

Los planes anuales de extracción minera, proyectos de ampliación o de creación de nuevos yacimientos se basan también a partir de los ciclos de precios que experimenta el cobre en el tiempo. El cobre al ser un commodity o en su definición, una materia prima

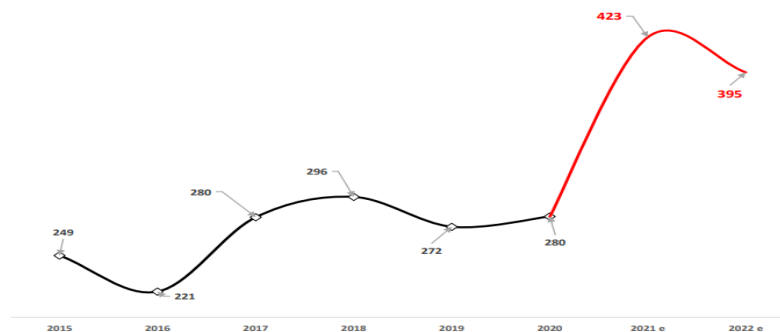
con un precio establecido, un alza o una caída de su precio afecta directamente las ganancias de una empresa debido a que ésta no puede poner el precio final de venta, que ya está regulada por la bolsa de metales de Londres. (Educa, 2018)

La afectación del precio en el cobre está sujeta principalmente al crecimiento de China y su demanda que afecta el mercado, ya que es el principal importador y consumidor de cobre en el mundo. Según lo indicado por COCHILCO, en su informe de tendencias del mercado del cobre del 2021, China en el 2020 representó el 54% de las demandas de cobre refinado versus el 45,6% que representa el resto del mundo. (Cochilco, 2021)

	2020		2021 e		2022 e	
	ktmf	Var. %	ktmf	Var. %	ktmf	Var. %
Producción cobre mina	20.624	-0,7%	21.031	2,0%	22.018	4,7%
Oferta cobre refinado	23.376	-0,3%	24.068	3,0%	25.186	4,6%
Primario	19.800	-0,5%	20.265	2,3%	21.157	4,4%
Secundario	3.577	1,1%	3.803	6,3%	4.030	6,0%
Demanda cobre refinado	23.415	-0,4%	24.212	3,4%	25.140	3,8%
China	12.734	4,1%	13.014	2,2%	13.275	2,0%
Resto del Mundo	10.681	-5,2%	11.198	4,8%	11.865	6,0%
<b>Balance</b>	<b>-39</b>		<b>-145</b>		<b>46</b>	

(Figura 1: Proyección de demanda de cobre refinado, Fuente: Cochilco, 2021).

Cuando China presenta signos de estancamiento o las expectativas del PIB son decrecientes, los precios del cobre tendrán a bajar producto del superávit que se genera por el bajo requerimiento.



(Figura 2: Proyección de precio del cobre para el periodo 2021-2022, Fuente: Cochilco)

Por ejemplo, si bien las proyecciones de China y el resto del mundo para el 2022, muestran un aumento en un 2% y 6% respectivamente en el consumo de cobre refinado

versus el 2021, se proyecta un superávit de 46 mil toneladas métricas, lo que afecta el precio del cobre bajando de 4,23 USD / libra a 3,95 USD / libra.

Frente a la disminución del precio del cobre, las empresas mineras generan planes mitigatorios para disminuir sus costos, entre ellos está la reducción de personal, el congelamiento de proyectos de ampliación, la búsqueda de proveedores de materias primas de producción con precios más económicos y la creación de gerencias de innovación o excelencia operacional que puedan proponer e implementar proyectos de mejora para reducir sus costos operacionales.

Según el reporte del Consejo Minero de competitividad y desarrollo del 2020, se explica que el rubro minero en Chile está perdiendo competitividad producto de que los costos de producción se han duplicado en los últimos cinco años, situándose por sobre el promedio mundial. Las leyes de cobre decrecientes, la falta del recurso hídrico, el aumento del costo energético, la falta de mano de obra especializada y la alta burocracia que retrasa el sacar permisos y autorizaciones han afectado la competitividad de la industria en los últimos años y mucho urge a las empresas el querer recuperarla para poder mantenerse competitivas en el mercado. (Consejominero, 2020)

Otro factor a considerar por parte del sector minero privado, es el aporte fiscal que realiza debido al royalty minero. Según explica el Consejo Minero, en su presentación de competitividad y desarrollo (2020), el sector minero ha sido fundamental para el desarrollo de Chile, debido a que el 15% del PIB, el 60% de las exportaciones y el 20% de los ingresos fiscales se han visto beneficiados producto de la industria minera. (Consejominero, 2020)

### **c) Social**

El tema social para las compañías mineras es un asunto importante, de hecho, se ve normalmente dentro de los pilares estratégicos de las compañías la responsabilidad social, ya que la actividad minera produce impacto en las comunidades, ya sea de manera económica o social. En este sentido es importante desarrollar herramientas



provisorias como la planificación de crecimiento a largo plazo de la mano con relaciones comunitarias. La Responsabilidad Social Empresarial, puede definirse como gestión ética de una empresa que busca la coherencia entre crecimiento económico, el soporte cultural, la equidad social y el cuidado del medio ambiente de un determinado lugar. En la industria minera, ésta es la clave para la comunión de las empresas con las comunidades. (CAMIPER,2021)

Hoy en día las comunidades están mucho más informadas de lo que realizan las empresas mineras y como éstas afectan el entorno donde viven, por lo cual las compañías controlan de forma exhaustiva los factores que pudiesen dañar su imagen, el entorno, además de crear planes de integración dando puestos de trabajo a personas del sector o crear en conjunto con municipios y juntas de vecino proyectos de integración que mejoren el bienestar de la población. Por ejemplo, se crean proyectos de infraestructura educacional y para el deporte, aportes económicos a bomberos y a otras instituciones públicas, programas de capacitación, entre otros. La idea es que la empresa sea un miembro más de la comunidad, buscando relaciones en conjunto de largo plazo.

En base a una encuesta realizada sobre las percepciones chilenas hacia la minería por CSIRO el año 2014, ésta indica que la minería para los chilenos es considerada el pilar económico central y necesario para el crecimiento de Chile, y que presenta beneficios económicos para el chileno promedio, para las familias chilenas, es un generador de infraestructura regional y es un creador de empleo y beneficios para las comunidades. Por otro lado, los impactos negativos que se consideran son el costo de vida, impacto en el sector agrícola y en el medio ambiente. (Moffat, y otros, 2014, pág. 16)



(Figura 3: Modelo de regresión estilizado de los beneficios e impactos usados para predecir la aceptación de la minería<sup>1</sup>, Fuente: (Moffat, y otros, 2014, pág. 16))

#### d) Tecnológico

Las empresas mineras desde el desarrollo de un yacimiento hasta la venta del producto final están sujetas siempre al uso de tecnologías y es porque el uso de éstas permite a la industria a través de plantas y equipos tecnológicos la producción de cobre, desde la extracción del mineral desde el yacimiento en tierra hasta el procesado y filtrado de la materia prima. Por otro lado, la incorporación de nuevas tecnologías en el proceso productivo generará ahorros para la empresa que las implemente en un corto, mediano plazo, así como un aumento de la productividad del personal interno. La situación actual, en donde los yacimientos se hacen más difíciles de explotar debido al aumento en su profundidad, leyes de cobre más bajas, entre otros factores, el impacto negativo en productividad de las operaciones es significativo, por lo que ha llevado a las empresas implementar procesos de tecnología e innovación, como áreas, departamentos o gerencias, para viabilizar la extracción de cobre en lo técnico - económico.

La implementación de tecnologías a las operaciones requiere estar dentro del pilar estratégico de una compañía y requiere de las áreas tanto de gestión a nivel ejecutiva como también las operativas para el éxito de este. Por otro lado, el rol de la implementación, en su mayoría, la desempeñan las empresas proveedoras externas de equipos y servicios, las que funcionan como soporte para atender los requerimientos que

<sup>1</sup> “ponderaciones Beta ( $\beta$ ) representan la fortaleza relativa de cada relación. Los valores  $\beta$  positivos indican una relación positiva; los valores  $\beta$  negativos indican una relación negativa”, (Moffat, y otros, 2014)

solicite la empresa minera mandante.

Hoy en día, la minería chilena está muy conectada entre sí y con sus competidores, tanto a nivel nacional, como mundial, por lo que las mejores prácticas, servicios e innovaciones se difunden entre empresas. Un claro ejemplo de innovación en el rubro es el caso de la utilización de camiones de extracción autónomos en Codelco división Gabriela Mistral o en caso de minera los Pelambres del grupo AMSA, la utilización de equipos de perforación autónomos. Estos equipos trabajan solos sin la necesidad de una persona / operador y solo con ayuda de los sistemas de telecomunicación y GPS de la mina. Por dar un ejemplo de lo que significa esto en el full potencial de ahorro y mejora en productividad, el tener 50 camiones autónomos ahorra a la compañía la contratación de 100 operadores (turno día y noche), disminuyendo los riesgos de una fatalidad, ahorrando costos por disminución de pago de sueldos y aumenta la productividad de la compañía, ya que tiene 100 personas menos en faena produciendo la misma cantidad de cobre. Para que se haga una idea de lo que significan los potenciales ahorros al incorporar proyectos tecnológicos a los procesos productivos, a continuación, se muestra un breve análisis económico a través de un VAC (valor actual neto de costo) a 20 años de operación para el proyecto de 6 perforadoras autónomas en minera los Pelambres:

Tabla 1: Comparación de costos entre maquinarias con y sin operador.

TC Dólar 923

ITEMS	Costos 6 Perforadoras Con Operador / mes	Costos 6 Perforadoras en Autonomía sin operadores / mes
Implementación de hardware - software automatización (6 equipos)	\$ -	\$ 5.200.000
Mano de Obra Proyecto	\$ -	\$ 350.000
<b>Total inversión</b>	<b>\$ -</b>	<b>\$ 5.550.000</b>
Sueldo fijo [12 operadores]	\$ 17.246	\$ -
Bonos mensuales por producción, salud, educación.	\$ 18.683	\$ -
Bono Negociación colectiva mensual	\$ 7.186	
Alimentación (3 comidas x 14 días) costo por comida	\$ 10.080	\$ -
Servicio Hospedaje y mantenimiento habitaciones	\$ 102.857	\$ -
<b>Total Costo Fijo</b>	<b>\$ 156.051</b>	<b>\$ -</b>
Costo por Mantenciones programadas + Imprevistos	\$ 625.000	\$ 656.250
Pérdidas de producción por baja utilización del equipo por ausentismo (0,5 equipos menos al mes)	\$ 75.000	\$ -

Tabla 2: Proyección de Inversión.

	Inversión año 0	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
VAC 6 Perforadoras Con Operador [i=12%] a 20 años	0	\$ 10.272.611	\$ 10.272.611	\$ 10.272.611	\$ 10.272.611	\$ 10.272.611	\$ 10.272.611	\$ 10.272.611	\$ 10.272.611	\$ 10.272.611
VAC 6 Perforadoras en Autonomía [i=12%] a 20 años	\$ 5.550.000	\$ 7.875.000	\$ 7.875.000	\$ 7.875.000	\$ 7.875.000	\$ 7.875.000	\$ 7.875.000	\$ 7.875.000	\$ 7.875.000	\$ 7.875.000

2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
\$ 10.272.611	\$ 10.272.611	\$ 10.272.611	\$ 10.272.611	\$ 10.272.611	\$ 10.272.611	\$ 10.272.611	\$ 10.272.611	\$ 10.272.611	\$ 10.272.611	\$ 10.272.611
\$ 7.875.000	\$ 7.875.000	\$ 7.875.000	\$ 7.875.000	\$ 7.875.000	\$ 7.875.000	\$ 7.875.000	\$ 7.875.000	\$ 7.875.000	\$ 7.875.000	\$ 7.875.000

<b>Tasa de interés</b>	<b>12,00%</b>
<b>VAC 6 Perforadoras Con Operador [i=12%] a 20 años</b>	<b>\$163.785.251,65</b>
<b>VAC 6 Perforadoras en Autonomía [i=12%] a 20 años</b>	<b>\$130.513.392,86</b>
<b>Delta ahorro</b>	<b>20,31%</b>

Analizando la información recogida en las Tablas 1 y 2, presentadas con anterioridad, es claro el ahorro potencial (20,31%), que representa el uso de maquinarias automatizadas o sin operador. Se ha tomado como referencia la inversión realizada a 20 años ya que son éstas las vidas útiles promedio de la industria para este tipo de equipo. Por otro lado, cabe mencionar que siendo este ahorra la cantidad de dinero que se ha producido, el mismo simboliza la oportunidad de contar con un capital que se encuentra disponible para ser reinvertido en caso de ser necesario, el cual beneficia el crecimiento económico de la empresa para futuros proyectos o inversiones.

### **1.3 Descripción General de la Empresa**

Minera los Pelambres, es una empresa nacional productora de cobre y metales derivados como el oro, la plata y el molibdeno, perteneciente al grupo Antofagasta Minerals (AMSA), se ubica en la comuna de Salamanca, Región de Coquimbo. Inició sus operaciones en el año 2000 con una vida útil de 43 años y es una de las cinco minas de cobre más ricas del mundo gracias a unas reservas de 2.100 millones de toneladas.

Según los datos de producción entregados por el grupo AMSA, el 2020 la empresa tuvo una producción anual promedio de 359.600 ton de cobre fino entregados como concentrado de cobre, 60.300 onzas de oro, 10.900 ton de molibdeno. El 60% de su propiedad pertenece al conglomerado Antofagasta Minerals, mientras que el otro 40% corresponde principalmente a un consorcio de empresas japonesas compuesto por Nippon Mining & Metals, Mitsubishi Materials, Marubeni y Mitsubishi Corp. (AMSA, 2021)

### 1.3.1 Pilares y Objetivos Estratégicos



(Figura 4: Pilares y objetivos estratégicos de MLP, Fuente: Propia).

Los 5 pilares estratégicos mostrados en la figura 4 nacen de la estrategia actual de AMSA y de Minera los Pelambres. El primer pilar corresponde a la competitividad, que enfoca sus objetivos hacia la excelencia operacional, productividad y asignación de capital para proyectos de competitividad operacional (CAPEX). El segundo pilar, el crecimiento, con foco en crecer sostenidamente y de manera sustentable en Chile y en el extranjero. El tercer lugar está la innovación y la transformación digital con uso de herramientas de la industria 4.0. Quinto pilar están las personas, como activos intangibles con una sostenida gestión de talentos que respalde la mejor mano de obra calificada del mercado. El sexto y último pilar tiene que ver con la seguridad y la sustentabilidad, con foco en el control de fatalidades, cuidado al medio ambiente, uso de energías renovables y la colaboración con las comunidades de la región.

### 1.3.2 Proceso Productivo

Según lo indicado por la página web de Minera los Pelambres (MLP), se inicia la extracción de su yacimiento minero a cielo abierto del tipo porfídico (sulfuros con una ley promedio de 0,51%) por medio del proceso de tronadura y carguío de mineral tronado a

través de camiones de alto tonelaje (350 ton) hasta el sector de chancador primario (2 unidades), en donde el mineral se tritura es reducido en tamaño para ser enviado al área de procesamiento a través de una correa transportadora que recorre 13 kilómetros por medio de túneles, hasta llegar a un stock pile. Desde ahí el mineral es enviado al chancado secundario que considera 3 molinos SAG y chancado terciario que considera 4 molinos de bola. Estas etapas de triturado son necesarias para alcanzar el tamaño adecuado de roca y así poder liberar las partículas de cobre. (Pelambres, 2020)

Posterior a ello, el mineral pasa al proceso de flotación en donde por medio del proceso de inyección de agua, reactivos y aire se agita para generar burbujas que se arrastran a la superficie que concentra el cobre. Finalmente pasa a la concentradora para producir el concentrado de cobre y enviado a través de un ducto al puerto Punta Chungo en forma de lodo. En el sector del puerto pasa por un proceso de secado y embarcado en buques. (Pelambres, 2020).



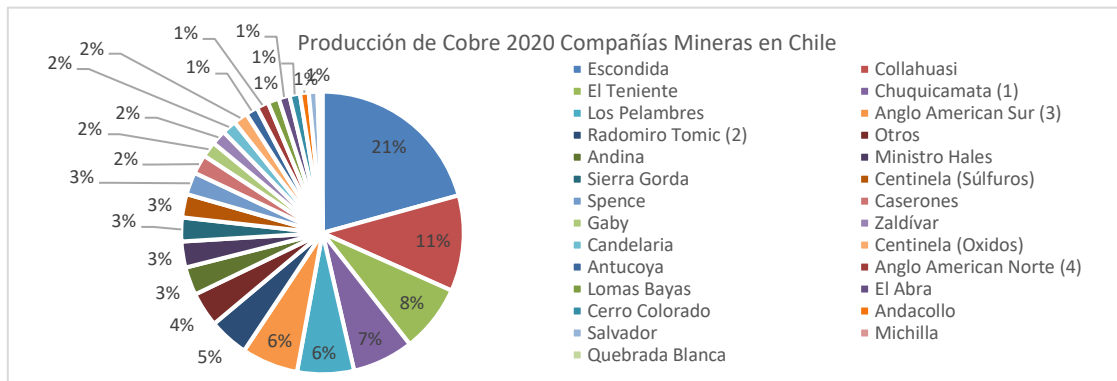
(Figura 5: Mapa de procesos para la producción de cobre, Fuente: web.pelambres.cl).

### 1.3.3 Clientes y Porcentaje de Participación

La cartera de clientes se mueve principalmente en el continente asiático (83%), principalmente en compañías asiáticas de refinería y fundición de cobre que reciben el concentrado de cobre. Fundiciones chilenas como Codelco Ventanas y también a medianas y pequeñas empresas dedicadas a la fabricación de aleaciones de acero y de cátodos y ánodos de cobre. (Pelambres M. L., 2021)



MLP está dentro de las cinco primeras productoras de cobre en Chile, teniendo un 6% de participación con 360.000 ton de cobre fino. (Cochilco, 2021)



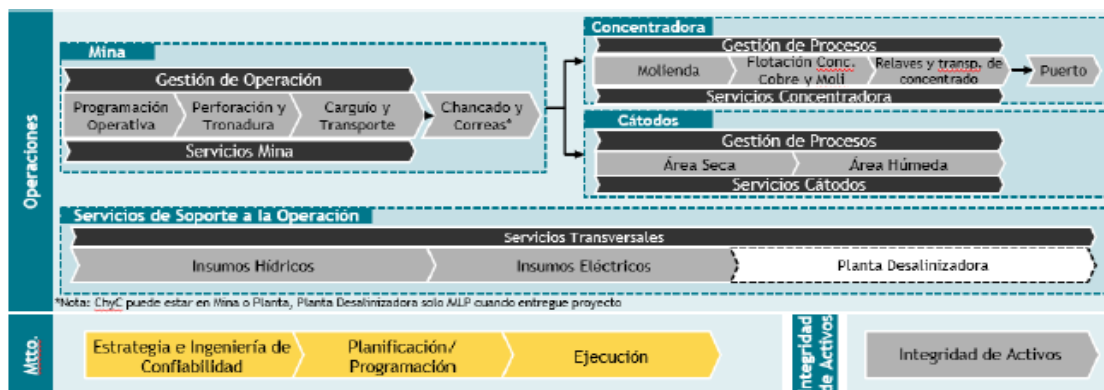
(Figura 6: Porcentaje de participación de compañías mineras, Fuente: Cochilco).

### 1.3.4 Competidores

Sus principales competidores directos son las grandes compañías mineras de nuestro país y que están dentro del top cinco, las cuales son: BHP Billiton Escondida, Collahuasi, Codelco El Teniente, Chuquicamata, Anglo American Los Bronces.

### 1.4 Acerca del problema y su justificación

En el área mina, existen dos áreas principales que gestionan el proceso productivo del traslado de mineral hacia la planta concentradora, que son operaciones y mantenimiento. Ambas áreas trabajan en conjunto para cumplir con los planes de producción comprometidos por año. Por una parte, operaciones, que es la gerencia responsable del de la extracción del mineral de la mina usando los activos físicos disponibles y apoyado por sub-áreas como servicios mina y servicios de soporte a la operación. Y por la otra parte, el área de mantenimiento, que es la encargada de dar la disponibilidad y confiabilidad a los equipos utilizados por el área de operaciones.

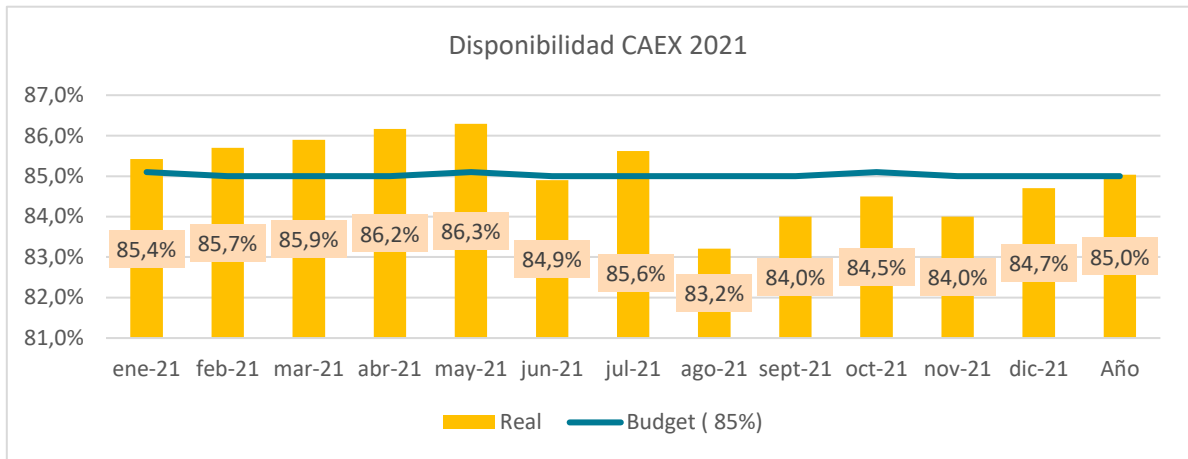


(Figura 7: Áreas de trabajo dentro del área mina, Fuente: Modelo operativo MLP).

Los activos físicos los cuales, son de responsabilidad del área de mantenimiento mina son: equipos de carguío, camiones de extracción y equipos de perforación:

- Equipos de carguío: 2 palas PH 4100 XPB, 1 pala PH 4100 XPC DC, 2 palas PH 4100 XPC AC, 2 palas Komatsu PC5500, 1 cargador frontal LT 1850 y 1 cargador frontal LT 2350.
- Camiones de extracción: 56 CAEX Komatsu 930 E-4.
- Equipos de perforación: 1 DM45, 3 PV351 D, 3 PV351 E, 1 PV316 D.

Actualmente en el área de camiones de extracción Komatsu 930 (CAEX), existen problemas de cumplimiento de la disponibilidad física. Si bien la disponibilidad acumulada del año 2021 cumple la meta del 85%, a partir del mes de junio en adelante existe la tendencia de no cumplir con la disponibilidad propuesta, lo cual representa una de las principales causas en el descenso de la productividad, esto a su vez se transforma en la reducción de volúmenes de producción, y un incremento en los costos de mantenimiento correctivos de equipos que han dejado de moverse.



(Figura 8: Disponibilidad física mensual flota CAEX, Fuente: Propia).

El requerimiento de la mina es tener un 85% de disponibilidad para los CAEX, lo que se traduce en 49 equipos operando y 7 en mantenciones programadas o imprevisto. El hecho de tener una menor disponibilidad de flota significa que existen más de 7 equipos fuera de servicio como promedio, lo que afecta el cumplimiento del plan de producción por tener menos camiones operativos que transporten el mineral dentro de la mina. Por otro lado, el tener un mayor número de camiones indisponibles para la operación significan otras pérdidas operativas como mayores tiempos de espera para los equipos de carguío (palas), esperas de mineral desde la mina y planta (chancado), lo que resulta en un menor movimiento de mineral por turno a chancado y menor envío a la planta concentradora.

El equipo de mantenimiento mina ha realizado los análisis de indisponibilidad mostrando que el principal factor de afectación son las fallas imprevistas de motores diésel de la flota de camiones de extracción (CAEX). Para dar solución a esta problemática se usó principalmente la herramienta de investigación de fallas de análisis causa raíz y de 5 porque, sus siglas en ingles RCA / 5 Why (root cause analysis), resultando en la generación de un plan de normalización que se centra en 5 acciones principales. La primera es el recambio de los motores diésel con mayor porcentaje de envejecimiento de la flota, la segunda fue la de incorporar tecnología y dar soporte al proceso actual de monitoreo de condiciones de motores diésel, como tercera acción se presenta la mejora continua en los procesos de ejecución del mantenimiento de motores diésel y por último

la acción de mejorar el soporte técnico de estos componentes dentro de la faena minera.

Enmarcado dentro de este plan de mejora de disponibilidad, el proyecto de tesis abarca el segundo plan el cual busca incorporar tecnología y dar soporte al proceso actual de monitoreo de condiciones de motores diésel. Desglosando y para explicar de mejor manera en que consiste este plan, los 3 acciones principales consistirán en integrar al proceso actual el uso de algoritmos de Machine Learning que generen predicciones de fallas más realistas, lo que ayudará a los analistas de monitoreo de condiciones a anticiparse a una falla catastrófica de motor diésel, la segunda acción será la creación de un plan de flujo de comunicación que formalice a la organización que decisiones se deben tomar con el activo físico cuando se presente alguna probabilidad de falla catastrófica y finalmente como tercera acción será el usar el sistema de recolección de datos actual en los camiones, llamada SPECTO, como base de información para el monitoreo de las condiciones del motor y generar soporte al equipo con la predicción de fallas.

## **1.5 Objetivos y Resultados Esperados del Proyecto**

### **1.5.1 Objetivo General**

Aumentar la disponibilidad de la flota de camiones de extracción mediante la eliminación de 1 falla catastrófica, al año, de los motores diésel de la flota de camiones de extracción de minera los Pelambres.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- Incorporar tecnologías de la información con el uso de herramientas de machine Learning al actual proceso de monitoreo de condiciones de motores diésel de la flota de transporte.
- Desarrollar un programa que utilice modelos de predicción de fallas, basadas en herramientas de Machine Learning, que ayude a los técnicos de monitoreo de

condiciones a priorizar que equipo debe ser intervenido o inspeccionado.

- Integrar el sistema SPECTO, ya instalado actualmente en los equipos, como base de información para el monitoreo de las condiciones del motor y la predicción de fallas.
- Generar un plan de flujo de comunicación, formalizada a la organización, que integre al área de operaciones y que funcione como habilitador para realizar la gestión oportuna del activo físico.

### **1.5.3 Resultados Esperados**

Se espera una vez implementado este proyecto, crear un dashboard de predicción de fallas que sea utilizado por personal de monitoreo de condiciones, que de soporte a sus labores actuales. Este dashboard, mostrado en un monitor de PC o televisor, mostrará algún indicador predictivo de falla y generará un ranking de criticidad de alertas tempranas que ayudarán a los técnicos de monitoreo a priorizar que equipo debe ser revisado o intervenido primero.

Por otro lado, se espera un documento difundido a la organización que muestre el flujo de comunicación entre las áreas de la gerencia de mantenimiento mina para lograr priorizar la intervención de algún equipo CAEX en base a esta herramienta tecnológica, ya sea, mediante alguna intervención de mantenimiento programado o como atención de imprevisto. También el documento indicará como relevar las solicitudes de mantenimiento al nivel ejecutivo si es que el nivel supervisor no pueda llegar a algún acuerdo en la toma de decisiones.

## 1.6 Alcance

El alcance de este proyecto es la incorporación de una herramienta tecnológica que sirva como soporte al proceso actual de monitoreo de condiciones de motores diésel del área de mantenimiento de camiones de extracción o CAEX en la mina. Se implementará un dashboard que funcione como herramienta de predicción de fallas catastróficas solo para motores diésel y que pueda ser utilizado por personal del área de monitoreo de condiciones. También se deberá modificar el rol existente de cada analista de monitoreo de condiciones para que el dashboard no pierda utilidad en el futuro y así evitar que este deje de ser usado.

Se excluye el uso de esta herramienta para cualquier otro componente del camión como alternador, radiador, sistema de aire acondicionado, neumáticos, tolva u otro componente o accesorio del camión. También se excluyen los CAEX que no tengan instalados el sistema SPECTO para la obtención de data. Por otro lado, se excluye la implementación de esta herramienta para otros activos físicos en la mina como palas, cargadores o perforadoras.

Se considera la creación de un KPI de predicción de falla usado en Machine Learning que es el RUL (remaining useful life) o vida útil restante del componente. Este indicador será integrado dentro del proceso de monitoreo de condiciones.

Por otro lado, el proyecto involucra crear el plan de comunicaciones, integrando solo a las áreas de mantenimiento en la mina, incluyendo a sus ejecutivos.

Cabe destacar que, aunque el proyecto se limita a los procesos de monitoreo de condiciones de motores diésel solo para el área de mantenimiento mina, no se descarta que a futuro este proyecto sea implementado para otras áreas de la empresa.

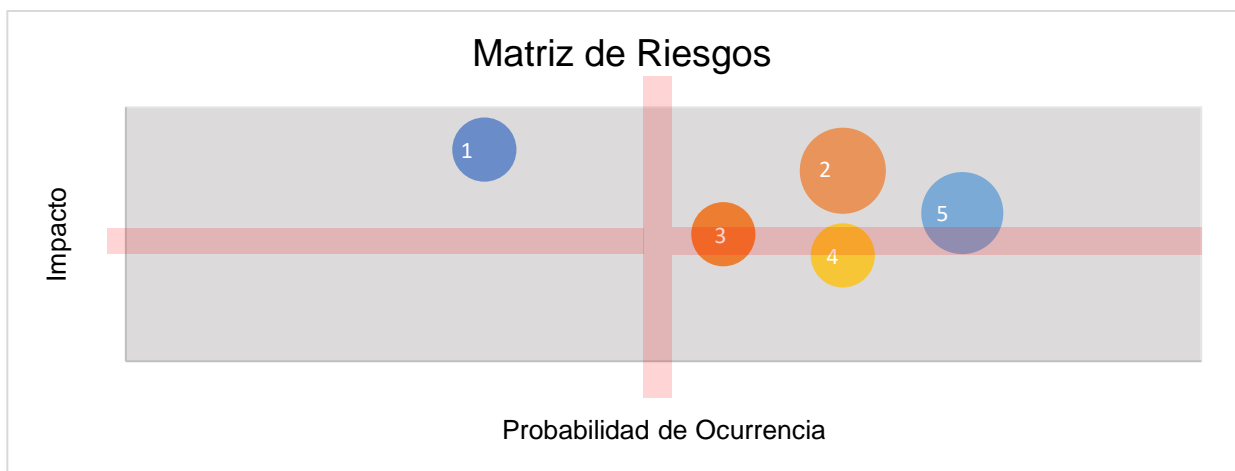
## 1.7 Riesgos Potenciales

Se muestran los siguientes riesgos potenciales que pudiesen comprometer la implementación exitosa del proyecto:

*Tabla 3: Riesgos potenciales del proyecto.*

N°	Riesgos Potenciales	Probabilidad de ocurrencia	Impacto	Severidad	Medidas o Abordaje
1	Falta de apoyo del rol ejecutivo o de jefatura directa.	3	10	30	Generar propuesta técnico – económica que muestre los beneficios del proyecto a la compañía. Aumentar la comunicación de los beneficios a la gerencia.
2	Falta de tiempo para ejecutar el proyecto.	6	9	54	Mayor control de cada una de las actividades. Planificación semanal para trabajar en proyecto fuera del turno laboral.
3	Fallos técnicos del sistema SPECTO	5	6	30	Monitoreo frecuente. Ocupar el soporte técnico existente.
4	Resistencia al cambio de la organización al implementar plan de comunicación.	6	5	30	Fomentar la participación del personal en la implementación de los procesos. Generar gestión del cambio.
5	Resistencia al cambio por parte de los técnicos de monitoreo de condiciones por el uso de esta nueva herramienta.	7	7	49	Fomentar la participación y comunicación a través de relaciones positivas. Modificar ROL y alcance del cargo en cuestión.

Posteriormente, se grafican en la matriz de impacto y ocurrencia para definir cuales tendrán mayor severidad en el proyecto.



*(Figura 9: Riesgos potenciales del proyecto, Fuente: Propia).*

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.1 Industria de la Minería

La industria minera consiste en un conjunto de actividades relacionadas a la extracción de los minerales ubicados en el suelo y subsuelo. Una de las primeras fases en esta actividad es explorar el lugar, para identificar aquellos que disponen de yacimientos de minerales. La extracción minera es una de las principales actividades económicas de numerosos países en el mundo como lo es Chile. Se trata de una fuente de recursos vital para la mayoría de las industrias humanas, que sirve de materia prima en la elaboración de los más diversos objetos y maquinarias(Enciclopedia de Humanidades, 2023).

Existen diversas formas de minería dependiendo del lugar, del elemento a minar y de las condiciones en que se desea extraerlo. Algunas de ellas tienen consecuencias ambientales graves. Al sitio en donde se extraen los elementos se le conoce como mina, y quienes se dedican a esta actividad como mineros (Enciclopedia de Humanidades, 2023).

#### 2.1.1. Tipos de Extracción

La minería puede darse en la tierra o en el mar (es decir, en el suelo marino), y mediante dos procedimientos distintos de extracción, principalmente:

- **Minería a cielo abierto.** Llamada también minería de superficie, la cual consiste en la eliminación de las capas superiores de roca, junto con la vegetación de la zona, para exponer los yacimientos minerales enterrados. El resultado es una gran rajadura en el suelo (*Open Pit Mining* o minería de pozo abierto), una abertura sobre un yacimiento concreto (explotación por canteras) o la modificación radical de la topografía de la zona (*Mountaintop mining*) a través de la desaparición de montañas (Enciclopedia de Humanidades, 2023).






- **Minería subterránea.** También llamada minería de subsuelo, consiste en penetrar la roca hacia el subsuelo y crear galerías y túneles que conduzcan a los yacimientos. Puede consistir en accesos horizontales (*drift mining*), accesos diagonales (*slope mining*) o verticales (*shaft mining*). Este tipo de minas tienen la desventaja de que pueden colapsar y sepultar a los mineros en su interior (Enciclopedia de Humanidades, 2023).

## 2.2. Equipos Utilizados en la Minería

Las actividades de producción dentro de una mina requieren el uso de equipos de alta envergadura que permitan el traslado de materiales, la carga de equipos, traslado de personal entre otras funciones. A continuación, se describen los equipos más comunes dentro de las operaciones mineras.

Tabla 4: Equipos utilizados en la minería.

Imagen	Descripción	Aplicación
	Camión de extracción 930 E4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mover materiales en minas de superficie.</li> <li>- Transporte de materiales en pendientes pronunciadas.</li> <li>- Transportar una carga útil de hasta 400 toneladas.</li> </ul>
	Palas mineras hidráulicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mover tierra o materiales minados.</li> <li>- Excavar.</li> <li>- Recoger material en una cargadora.</li> <li>- Retirar la roca o la tierra, también conocida como sobrecarga, de las minas de superficie para abrir el emplazamiento.</li> <li>- Transportar algunos materiales minados.</li> </ul>
	Excavadoras	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Construir minas empujando el material de la superficie para dejar al descubierto el terreno que hay debajo.</li> <li>- Mantener una mina empujando la tierra fuera de las zonas de trabajo.</li> <li>- Recuperar el terreno alrededor de las minas.</li> <li>- Arrancar la materia vegetal del suelo.</li> <li>- Rastrillar el terreno alrededor de una mina.</li> </ul>

	<p>Palas de cuerda eléctricas</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Retirar la sobrecarga para preparar una mina.</li> <li>- Excavación de materiales duros.</li> <li>- Mover tierra.</li> <li>- Retirar rocas.</li> <li>- Transferencia de material minado a una cargadora.</li> <li>- Transportar el material.</li> </ul>
	<p>Perforadoras rotativas y perforadoras de roca</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Creación de agujeros para cargas de voladura para la minería de superficie.</li> <li>- Perforación de producción para hacer pozos.</li> <li>- Perforación de rocas en pre-salida.</li> <li>- Ampliación de minas.</li> </ul>
	<p>Motoniveladoras</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Empujar el material de la superficie para despejar las carreteras.</li> <li>- Crear pendientes adecuadas para permitir que el agua drene fuera de las carreteras.</li> <li>- Construir caminos de acarreo.</li> </ul>
	<p>Dragalinas</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mover toneladas de sobrecarga para preparar una mina de superficie.</li> <li>- Retirar el material expuesto, como la arena de alquitrán, de una mina a cielo abierto.</li> <li>- Reducir las emisiones en comparación con otros métodos de retirada de la sobrecarga.</li> <li>- Cortar en superficies de paredes altas y eliminar el material.</li> </ul>
	<p>Tractores de ruedas</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Construcción de carreteras.</li> <li>- Realización de cortes iniciales en el terreno para una mina.</li> <li>- Recuperación de terrenos.</li> <li>- Realización de operaciones mineras.</li> </ul>
	<p>Cargadores y camiones mineros subterráneos</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Excavar.</li> <li>- Cargar roca o material minado en camiones.</li> <li>- Transportar el material a la superficie.</li> </ul>

## 2.3 Mantenimiento

Según Cedeño (2013), el mantenimiento es toda actividad cuya intención sea la de mantener a un equipo o sistemas en sus condiciones óptimas de operatividad. El hacer mantenimiento no implica reparar un equipo roto tan pronto como se pueda si no mantener el equipo en operación a los niveles especificados. La primera prioridad de mantenimiento es prevenir las fallas de los equipos y de este modo reducir los riesgos de paradas imprevistas.

Por otro lado, los equipos, máquinas, sistemas e instalaciones han evolucionado y han cambiado a lo largo de los tiempos, haciéndose cada vez más sofisticados, exigiendo una mejora continua en los procesos de mantenimiento y un trabajo más riguroso por parte del gestor de mantenimiento.

Aunque haya habido una evolución de los equipos e instalaciones, las necesidades de mantenimiento siguen siendo semejantes. Por esta razón, y entendiendo el mantenimiento como un conjunto de acciones técnicas que permiten regular el funcionamiento normal de esos mismos equipos, podemos dividirlo en tres grandes grupos:

Otra definición acertada sería la de González (2016), quien señala que el mantenimiento es la función empresarial a la que se encomienda el control del estado de las instalaciones de todo tipo, tanto las productivas como las auxiliares y de servicios. En ese sentido se puede decir que el mantenimiento es el conjunto de acciones necesarias para conservar o restablecer un sistema en un estado que permita garantizar su funcionamiento a un coste mínimo. Conforme con la anterior definición se deducen distintas actividades:

- Prevenir y/o corregir averías.
- Cuantificar y/o evaluar el estado de las instalaciones.
- Aspecto económico (costes).

En este particular, González (2016), destaca la importancia de la misión del mantenimiento en las organizaciones, dicha misión se centra en lo siguiente:

- La vigilancia permanente y/o periódica de los equipos.
- Implementación de acciones preventivas.
- Puesta en marcha de acciones correctivas (reparaciones).
- Reemplazo de maquinaria, partes o equipos.

Señalando también en su texto los objetivos principales del mantenimiento, los cuales se detallan a continuación:

- Aumentar la disponibilidad de los equipos hasta el nivel preciso.
- Reducir los costes al mínimo compatible con el nivel de disponibilidad necesario.
- Mejorar la fiabilidad de máquinas e instalaciones.
- Asistencia al departamento de ingeniería en los nuevos proyectos para facilitar la mantenibilidad de las nuevas instalaciones.

### **2.3.1 Tipos de Mantenimiento**

Son frecuentes las opiniones encontradas entre los profesionales del Mantenimiento en relación con el tema de los tipos o políticas de mantenimiento. En este apartado de la investigación se estarán abordando los tipos de mantenimiento más comunes en la industria. (Sexto, 2018)

- **Mantenimiento Correctivo**, conocido también por mantenimiento reactivo o “funcionar hasta estropearse”; su premisa es, cuando se avería un equipo, hay que repararlo (¡o sustituirlo!). En otras palabras, es la actividad técnica ejecutada después de producirse una avería y tiene como objetivo restaurar el activo a una condición en la que puede funcionar como deseado, ya sea debido a su reparación, ya sea debido a su sustitución.

Según Sexto (2018), El mantenimiento Correctivo a su vez se subdivide en aquel que se realiza inmediatamente después de la verificación de un fallo funcional (correctivo inmediato) y el mantenimiento correctivo diferido, que puede programarse, a diferencia del correctivo inmediato que se impone como necesidad de intervención no prevista para contrarrestar las consecuencias del fallo. Lo une el hecho que, tanto el correctivo inmediato como el correctivo diferido, se ejecutan siempre a posteriori de un fallo.

- **Mantenimiento Preventivo**, que es el mantenimiento regular realizado de acuerdo con calendarios definidos, independientemente de la condición del equipo; este surge por oposición al mantenimiento correctivo. En lugar de esperar que se produzca la avería, este tipo de mantenimiento tiene como objetivo *prevenir* que eso ocurra. (Sexto, 2018)

El mantenimiento preventivo ocurre de modo cíclico y programado, independiente de la condición del activo y con el objetivo de evitar averías y minimizar las consecuencias de colapsos de equipos. La frecuencia es definida por el gestor de mantenimiento con base en una valoración de la vida útil del equipo y en las recomendaciones del fabricante. Ejemplos de acciones de mantenimiento preventivo incluyen revisiones periódicas, inspecciones, limpieza y lubricación de piezas.

- **Mantenimiento Predictivo**, también llamado, mantenimiento con base en la condición, basa en la constante supervisión del equipo en funcionamiento y en la previsión de averías.

De todos los tipos de mantenimiento, este es el más reciente y el que requiere más inversión a nivel tecnológico. El objetivo del mantenimiento predictivo es prever cuándo una avería está a punto de producirse. Cuando se detectan ciertas condiciones indeseables, se programa una reparación antes de la ocurrencia, antes de que el equipo, efectivamente, se averíe, eliminando, de este modo, la necesidad de mantenimiento correctivo oneroso o mantenimiento preventivo innecesario.

Se basa en la condición física y operativa de los equipos a través de la supervisión regular y pruebas de la condición y rendimiento de los equipos, usando técnicas

avanzadas como análisis de vibración, análisis de aceite, acústico, pruebas de infrarrojos o imagen térmica.

#### **2.4. Modelo de predicción de fallas**

Para Fuentes (2019), el Modelo Predictivo sirve para descubrir oportunidades y prevenir situaciones adversas. Es muy usado por las empresas a nivel de logística, proyecciones económicas y a la hora de hacer reportes de ventas, para saber donde podría haber una falla, o cuantas podrían ser las ventas futuras.

Fuentes sugiere que antes de seleccionar una estrategia de mantenimiento para un equipo es conveniente conocer los fenómenos que producen su degradación y falla. Las fallas pueden ser clasificadas como:

Fallas catastróficas: contemplan las fallas repentinas y completas, tales como la ruptura de un componente mecánico o un corto circuito en un sistema eléctrico. Es difícil observar la degradación y por tanto no es posible establecer procedimientos preventivos.

Fallas por cambios en parámetros.

- desgaste mecánico,
- fricción,
- aumentos en la resistencia de componentes electrónicos; la degradación es gradual y puede ser observada directa o indirectamente.

De acuerdo con la tasa de fallas (frecuencia esperada de falla), la vida de un equipo se puede dividir en tres etapas:

- etapa temprana, caracterizada por una tasa de falla que decrece en el tiempo;
- etapa madura, caracterizada por una tasa constante de fallas;
- ancianidad, caracterizada por una tasa creciente de fallas. En el contexto de la recolección de datos de falla podemos distinguir:

- **Fallas primarias**

Son el resultado de una deficiencia de un componente, cuando ésta ocurre en condiciones de operación dentro del rango nominal.

- **Fallas secundarias**

Son el resultado de condiciones no nominales de operación. La falla podría no haber ocurrido si las condiciones hubiesen estado en el rango de diseño del componente.

Condiciones que causan fallas secundarias:

- temperaturas anormales,
- sobrecarga,
- velocidad anormal,
- vibraciones ambientales excesivas,
- corriente excesiva,
- contaminación,
- corrosión,

La ocurrencia de condiciones ambientales degradadas no siempre conlleva la ocurrencia de una falla secundaria.

## **2.5. Machine Learning**

Según Maisueche Cuadrado (2019), El machine Learning o aprendizaje automático es la técnica que detectan entre otras cosas patrones relevantes dentro de un conjunto de datos. Dicha técnica, se ha convertido es una herramienta común en las tareas que requieran extraer información a partir de grandes cantidades de datos. Algunos ejemplos de tecnología basada en machine Learning son el filtrado de correos electrónicos, sistemas de recomendaciones en páginas como eBay o Amazon, detección facial reconocimiento del habla, modelamiento y pronostico del tiempo atmosférico, etc.

Existen diferentes de tipos de aprendizaje automático, que dependiendo del problema se deben utilizar. Estos son el aprendizaje supervisado, el aprendizaje no supervisado, el

aprendizaje reforzado y el aprendizaje profundo o Deep Learning. Cada uno presenta características y algoritmos computacionales distintos. (Maisueche Cuadrado, 2019).

También se tiene que diferenciar los conceptos de Big Data y de minería de datos (Data Mining). El Big Data tiene relación con la obtención y almacenamientos de grandes cantidades de datos, mientras que el Data Mining es el análisis profundo de patrones en los datos. Esto quiere decir que el Big Data necesita de conocimiento entregado por el Data Mining. Por otro lado, el Data Mining puede trabajar con pequeñas bases de datos, mientras que el Big Data no. (Maisueche Cuadrado, 2019).

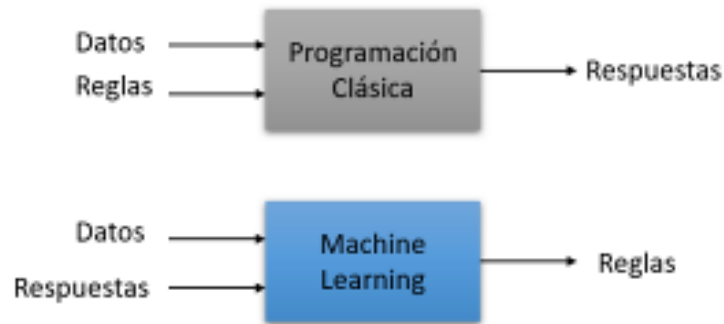
Por otro lado el machine learning es parte de la inteligencia artificial y comparte técnicas del Data Mining. Respecto al reconocimiento de patrones, del machine learning nace un campo llamado deep learning el cual emplea ciertos tipos de algoritmos como redes neuronales para aprender de forma no supervisada. (Villén, 2019)



Figura 10: Machine Learning y su relación con otros campos, Fuente: (Villén, 2019)).

La diferencia entre la programación clásica y el machine learning es que en la programación clásica se diseñan un conjunto de reglas por una persona con el fin de obtener respuestas que cumplan con dichas reglas a partir con datos de entrada. En cambio con la programación con machine learning, ésta será la encargada de obtener el mejor conjunto de reglas que se relacionen con los datos de entrada y los tipos de repuestas que esperamos obtener.





(Figura 11: Diferencias de programación clásica versus el Machine Learning, Fuente: Maisueche Cuadrado, (2019))

### 2.5.1) Tipos de aprendizaje automático

Dependiendo del tipo de problema que se quiera solucionar, existen dos tipos de lenguaje que con sus algoritmos de Machine Learning correspondientes, estos serían el aprendizaje supervisado y el aprendizaje no supervisado.

#### 2.5.1.1) Aprendizaje supervisado:

Este tipo de lenguaje, la persona usa pares de datos de entrada y salida, es decir, la base de datos que se utiliza para construir el modelo se encuentra la información que se desea predecir. Por otro lado, existen dos tipos de problemas que se pueden solucionar: los problemas de regresión, que predicen una cantidad continua de datos y los problemas de clasificación. Que predicen una etiqueta. (Maisueche Cuadrado, 2019). A continuación se muestran los algoritmos mas utilizados en este tipo de aprendizaje.

- **Regresión:**

- Regresión lineal. Ejemplos: Predecir el número de paraguas que se venderán en función de un histórico de ventas.

- Regresión lineal múltiple: Ejemplos: Predicción de ventas de un producto en función del dinero invertido y publicidad de televisión y publicidad de radio. (2 variables independientes)
- Regresión polinomial. Ejemplos: Demanda horaria de energía en función de la temperatura exterior (comportamiento no lineal).

• **Clasificación:**

- Regresión logística. Ejemplos: Predecir si un tumor es benigno o maligno en función de las edades de un paciente y del tamaño del tumor. (Maisueche Cuadrado, 2019)
- Support Vector Machine (SVM): Ejemplos: Clasificación de imágenes.
- K-Nearest Neighbors: Ejemplos: Sistemas de recomendación de compras en Ebay / Amazon o detección de anomalías.
- Random Forest. Ejemplo: Identificar si una imagen representa un paisaje al aire libre o el espacio exterior.
- Naive Bayes, clasificador de probabilidad. Ejemplos: Indicar si en una base de datos el texto involucra un tema en específico, por ejemplo, deportes.

**2.5.1.1.1) Algoritmo XGBoost**

Este tipo de algoritmo de aprendizaje automático supervisado para clasificación y regresión. Su nombre es la abreviatura de “extreme gradient boosting o que en español significa refuerzo de gradientes extremo y se basa en árboles de decisiones y supone una mejora sobre otras metodologías como Random Forest o refuerzo de gradientes. Este método funciona bien con bases de datos grandes. **(Tianqi & Guestrin , 2016).**

Hoy en día, es el algoritmo supervisado de machine learning más usado en la actualidad, debido por su fácil implementación, buenos resultados y porque es utilizado en varios lenguajes de programación. **(Sanz, 2018)**

Para explicar brevemente el método de entrenamiento del dataset con XGBoost, primero se debe realizar una predicción inicial y los residuales se calculan en función de valor predicho y valores observados. Posteriormente se crea un árbol de decisión con los residuales utilizando una puntuación de similitud con los residuales. Luego se analiza la semejanza de datos de una hoja, así como la ganancia de semejanza de la división posterior. Se comparan las ganancias para determinar una entidad y un umbral para un nodo. Para la clasificación, los valores se calculan mediante el registro de probabilidades. Finalmente, la salida del árbol se cambia en el nuevo residual para el dataset, que se utilizará para construir un nuevo árbol. Este proceso debe repetirse hasta que los residuales dejan de reducirse o por el número de veces que especificó el programador. Cada árbol subsiguiente aprende a partir de los árboles anteriores. **(Tianqi & Guestrin , 2016)**

### **2.5.1.2) Aprendizaje no supervisado**

Este tipo de aprendizaje, el algoritmo detecta patrones existentes en los datos de entrada, sin necesidad de verificar cual es el de salida. Por lo tanto, el objetivo es obtener información significativa de los datos de entrada, que no están etiquetados y estructura desconocida. (Maisueche Cuadrado, 2019). Existen 2 tipos de problemas , que dependiendo del problema, son utilizados, en este caso son el agrupamiento o clustering y la reducción dimensional. El clustering se encarga de crear conjuntos de datos con características similares, mientras que la reducción dimensional se encarga de buscar información redundante en los datos para reducir el numero de variables. (Román, 2019). A continuación se muestran los algoritmos mas utilizados en este tipo de aprendizaje.

- **Clustering:**

- K-means. Ejemplos: Segmentación del mercado, agrupamiento de palabras con definiciones similares para la mejora de motores de búsqueda.

- GMM (Gaussian Mixture Models)
- K-Modes

• **Reducción dimensional:**

- PCA (Principal Component Analysis), análisis de componentes principales. Ejemplos: Usado como etapa de pre procesamiento, compresión de imágenes.
- ICA (Independent Component Analysis), análisis de componentes independientes. Ejemplos: Extraer la voz de un locutor en particular en el ambiente, filtrando el ruido de fondo.
- LDA (Linear Discriminant analysis, análisis discriminante lineal.
- SVD (singular value Decomposition), Descomposición en valores singulares. Ejemplos: recomendaciones para un usuario sobre que comprar por internet.

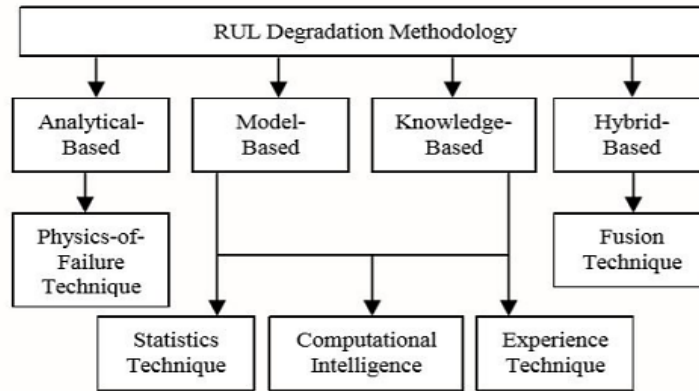
### **2.5.2) Remaining Useful Life (RUL)**

El RUL del inglés remaining useful life, es la vida funcional remanente de un activo antes de su falla. A tener en uso el RUL, los responsables del mantenimiento pueden programar actividades de forma planificada al equipo sin que este llegue a la falla (Baru, 2018).

El modelo de estimación del RUL no solo predice el RUL en sí, si no que también crea un límite de confianza en la predicción. Los datos de entrada del modelo son normalmente extraido de sensores o registros cuyo comportamiento cambia de manera predecible, a medida que el equipo se degrada. (Baru, 2018).

Existen 2 métodos de cálculo del RUL o del tiempo estimado de falla, el primero es el método basado en el conocimiento y el otro método basado en el modelo. El método basado en el conocimiento es el que predice gracias a la experiencia ganada por los expertos sintomáticos que leen la información capturada en los sensores y por juicio de

experto se toman decisiones de cuanto tiempo podria durar un equipo. Por otro lado está el método basado en el modelo, que es el que captura información de los sensores o de data historica y los entrena en estos algoritmos de machine learning para obtener un dato cuantitativo. (Diaz, 2019, pág. 16).

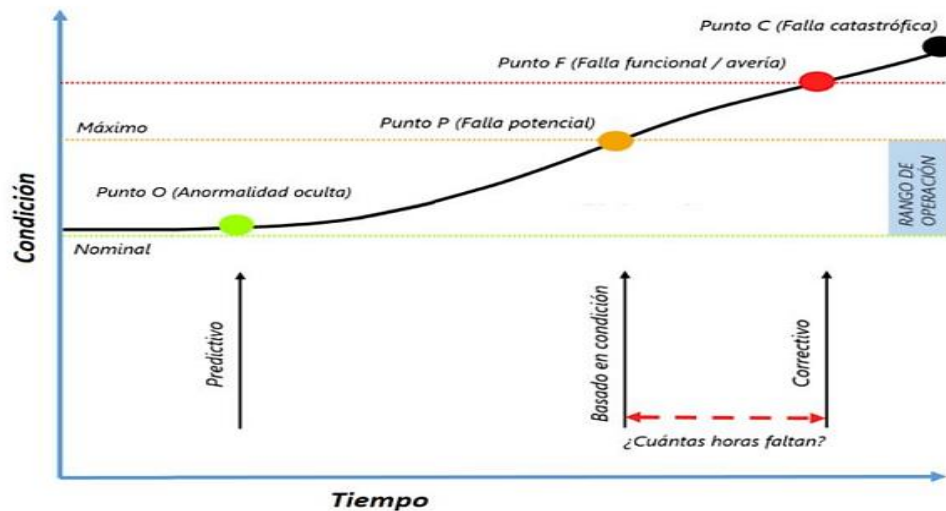


(Figura 12: Clasificación de técnicas para predicción de RUL, Fuente: DÍAZ, 2019, pág. 16).

También se pueden ocupar métodos híbridos, utilizando tanto la experticia técnica de los analistas como los resultados de cálculos analíticos para tomar una mejor decisión respecto a cuánto tiempo puede durar esa condición hasta la falla catastrófica.

De hecho, el desafío de los analistas de condiciones es fijar el correcto rango de operación desde que se obtiene una anomalía por alguna técnica predictiva. Ese intervalo de tiempo que uno se pregunta, ¿Cuánto tiempo o cuantas horas faltan para la falla?, y saber responder esa pregunta con datos obtenidos del análisis de Machine Learning, combinándolo con juicio experto, es el verdadero valor que se le agrega al proceso para evitar que la falla catastrófica nos pille de imprevisto.

La siguiente imagen resume lo comentado, mostrando la curva P-F, que explica el comportamiento de una falla al ser detectada, siendo P, la falla potencial y la F el imprevisto.



(Figura 13: Esquema curva P-F, Fuente: DÍAZ, 2019, pág. 16)

## 2.6. Programa monitoreo de condiciones SPECTO

Este programa de monitoreo de condiciones es utilizado por la empresa Cummins Chile, actual fabricante de motores diésel QSK60. Según (Chile, 2017), utiliza la gestión de parámetros de los motores que consiste en la implementación de sensores en ciertos puntos del motor, para la adquisición y transferencia de datos que al ser utilizadas por expertos, permite actuar de forma preventiva frente a alertas entregadas por el sistema. El programa también proporciona vigilancia técnica y genera notificaciones a eventos que ocurren durante la operación del motor. Algunas características son la: descarga de data, obtención de gráficos, reportes e integración con sistemas de análisis de aceite.

## 2.7. Metodología de trabajo

Una metodología es un conjunto de prácticas, procedimientos y reglas utilizadas por personas que trabajan en una disciplina o en otras palabras es un conjunto de métodos de trabajo (Pérez, 2021). Este conjunto de prácticas debe tener una estructura y un orden sistemático para poder encontrar soluciones optimas a problemas complejos ya que por separadas éstas no tendrían relación alguna.

Resulta indispensable trabajar bajo una metodología que guíe el paso a paso a la persona o profesional a encontrar la solución a un problema detectado. De allí nace la metodología de ingeniería de negocios, cuya disciplina busca formalizar y proveer una metodología para el diseño integral de los negocios, desde el análisis y la creación de la estrategia empresarial, pasando por el diseño del modelo y procesos de negocio hasta llegar al diseño de aplicaciones tecnológicas o infraestructura TI para apoyar la ejecución de los procesos (Rojas, 2008).

### **2.7.1 Metodología de ingeniería de negocios**

La metodología de trabajo para esta tesis y como elemento diferenciador proveniente de este magister se centra en la aplicación de la metodología de la ingeniería de negocios, la cual consta de seis ámbitos los cuales se explican a continuación:

- **Planteamiento Estratégico:** Tiene relación con definir claramente la estrategia del negocio, definiendo sus objetivos estratégicos y tomando la visión y misión de la empresa. Se utilizan metodologías de análisis como HAX y BSC.
- **Definición del modelo de negocio:** Busca mencionar, a partir del planteamiento estratégico, quienes serán los clientes potenciales y como se podría generar un resultado económico positivo (Rojas, 2008). Se ocupan metodologías de análisis como lienzo de Canvas, entre otros similares.
- **Diseño de la arquitectura de proceso:** Busca definir la estructura general de procesos que necesita el negocio, es decir, definir y estudiar interacciones, entradas y salidas de cada macro proceso. Este paso busca moldear el siguiente paso que consiste en detallar los procesos internos de la empresa. Para el modelado de procesos se utiliza la metodología de patrones de negocio de Barros<sup>2</sup>. Barros en su metodología propone una serie de patrones de negocio que sirven de referencia para el rediseño de cualquier proceso o de creación de un

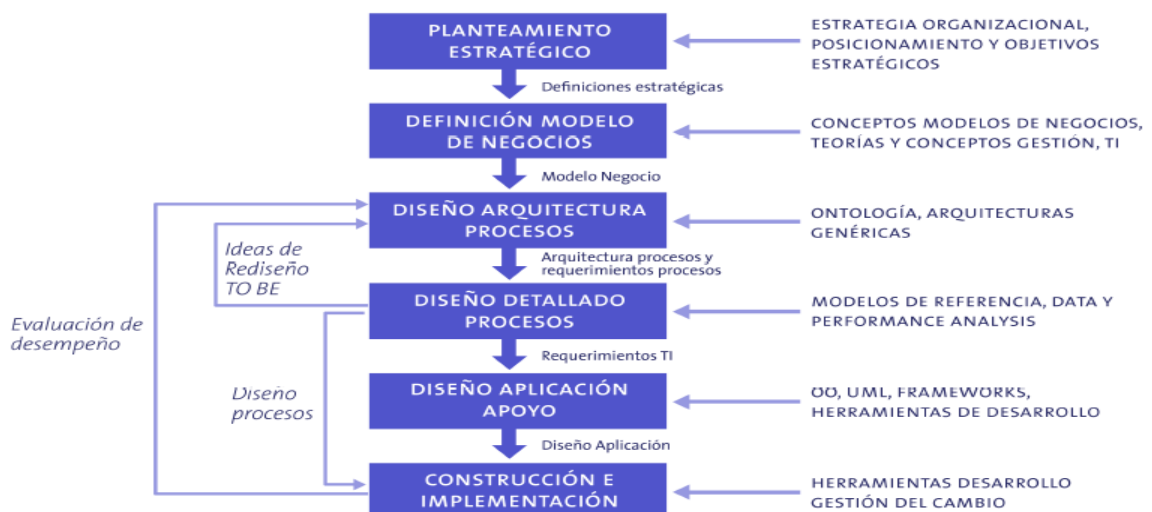
---

<sup>2</sup> (Barros, 2000)

proceso nuevo. Y finalmente se implementa una solución, la cual debe ser tecnológica y que de soporte al proceso rediseñado. Esta solución puede ser un prototipo funcional explicando las interacciones con el rediseño del proceso. (Muñoz & Vergara Silva, 2021, pág. 4).

- **Diseño de los procesos:** Consiste en definir de forma detallada como se ejecuta cada macro proceso de la arquitectura definida previamente, es decir, indica como cada entrada y salida se relaciona entre sí para ejecutar alguna actividad del negocio (Rojas, 2008).
- **Diseño de las aplicaciones de apoyo a los procesos:** Consta en desarrollar aplicaciones que apoyarán a las personas en la implementación de los procesos diseñados previamente. Estas aplicaciones permiten registrar información relevante para la ejecución oportuna del proceso y para futuras mejoras u optimizaciones (Rojas, 2008).
- **Construcción e implementación:** En este punto se desarrollan las aplicaciones diseñadas en el punto anterior, pero utilizando Ti adecuadas de acuerdo a las exigencias del negocio. Por otro lado, se establece un plan piloto o “demo” de la propuesta tecnológica más el rediseño del proceso (Rojas, 2008).

A continuación se muestra en resumen la metodología de ingeniería de negocios que se utilizará para la creación de este proyecto del magister:



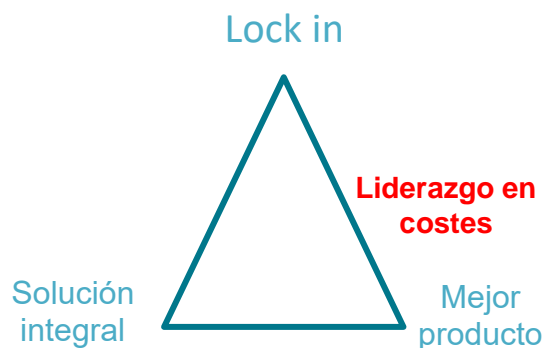
(Figura 14: Metodología Ingeniería de Negocios, Fuente: Julio, 2020, pág. 52).



## CAPÍTULO 3: PLANTEAMIENTO ESTRATÉGICO Y ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

### 3.1 Posicionamiento Estratégico

El posicionamiento estratégico de Minera Los Pelambres, según el modelo delta de HAX, es por liderazgo en bajos costos en base a la eficiencia operacional de la compañía, debido a que al tratarse de un commodity no es posible diferenciarse por un precio bajo ya que no es posible fijar el precio de venta. Sin embargo, si es posible volver más eficiente el proceso productivo de la compañía y reducir los costos, aumentando su productividad. Esto significa que al volverse más eficiente la operación, entrando en la excelencia operacional, MLP logrará diferenciarse de la competencia y alentar a posibles inversionistas a inclinarse por la oferta entregada por la compañía.












(Figura 15: Posicionamiento estratégico según HAX, Fuente: Propia).

### 3.2 Modelo de Negocios

Para explicar el modelo de negocio de MLP, se usa el lienzo CANVAS, el cual se describe a continuación:

- Segmento de clientes: se tiene como clientes principales a las compañías asiáticas de refinería y fundición de cobre, que compran el concentrado de cobre para convertirlo en ánodos y cátodos de cobre. Por otro lado, mineras chilenas de mediana y pequeño tamaño productivo que usan el concentrado de cobre para fundirlo y generar ánodos de cobre como Codelco Ventanas.

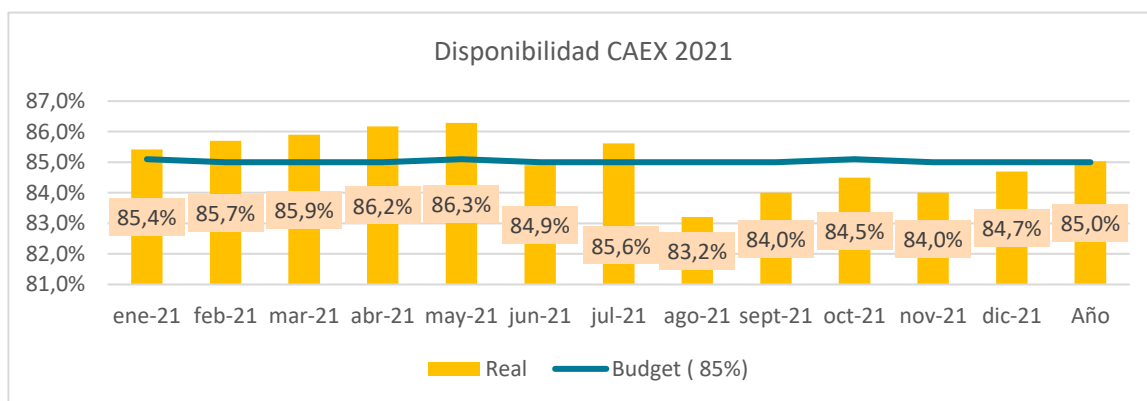
- La propuesta de valor: comercializar concentrado de cobre con los más altos estándares de calidad, seguridad, confiabilidad y cumpliendo siempre los compromisos de entrega. Mejorando continuamente sus procesos y siendo cada vez más productivos.
- Canales: uso de la plataforma web de la empresa, se mantiene una relación con el cliente que da recomendaciones y se publica en rankings la posición de la minera respecto a los precios de los minerales.
- Relación con los clientes: consiste en visitas y reuniones constantes, además de evaluaciones de desempeño, con la idea de formar relaciones a largo plazo.
- Actividades clave: operación y mantenimiento de activos físicos de alto valor de inversión, levantamiento de nuevas oportunidades de negocio, selección de personal, capacitación, rediseño de procesos, generar planes que aumenten la productividad de la línea operativa, extracción y distribución de mineral de cobre sin impacto a las comunidades ni al medio ambiente,
- Recursos clave: personal capacitado técnicamente, infraestructura estándar a la minería de alta competencia, activos físicos mineros de alta criticidad e inversión, capital financiero (CAPEX y OPEX), energía, combustibles y agua, Permisos y licitaciones
- Socios clave: empresas de servicios especializado, empresas de: transporte de personal, servicio de alimentación y asistencia mecánica, proveedores de materiales y herramientas, empresas que den capacitación técnica, seguridad y prevención de riesgos.
- Fuentes de ingreso: contratos de venta de concentrado de cobre y derivados de largo plazo.
- Estructura de costos: costos directos e indirectos que involucran remuneraciones, equipamiento, oficina, instalación de faenas, bodega, equipos menores y herramientas. Gastos generales y costos financieros, relacionado a IVA e impuestos asociados a la extracción y exportación de minerales

<b>Socios clave</b>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Empresas de servicios especializado.</li> <li>- Empresas de: transporte de personal, Servicio de alimentación. y asistencia mecánica.</li> <li>-- Proveedores de materiales y herramientas.</li> <li>- Empresas que den capacitación técnica, seguridad y prevención de riesgos.</li> </ul>	<b>Actividades clave</b>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Extracción y producción de concentrado de cobre.</li> <li>- Diseño de estándares técnicos y de seguridad</li> <li>- Implementar planes de gestión de productividad</li> <li>- Producción segura sin impacto al medio ambiente y comunidades.</li> </ul>	<b>Propuesta de valor</b>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Comercializar concentrado de cobre con los más altos estándares de calidad, seguridad y confiabilidad, cumpliendo siempre los compromisos de entrega.</li> </ul>	<b>Relación con clientes</b>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Visitas y reuniones periódicas antes, durante y después de la compra.</li> <li>- Evaluaciones con indicadores de satisfacción.</li> <li>- Fortalecer relaciones de largo plazo para tener compras periódicas.</li> </ul>	<b>Segmento de clientes</b>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Compañías asiáticas de refinería y fundición de cobre.</li> </ul>
	<b>Recursos clave</b>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Personal capacitado.</li> <li>- Infraestructura estándar a la minería de alta competencia.</li> <li>- Activos físicos mineros de alta criticidad e inversión.</li> <li>- Capital financiero (CAPEX y OPEX).</li> <li>- Energía, combustibles y agua.</li> <li>- Permisos y licitaciones</li> </ul>		<b>Canales</b>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Plataforma Web.</li> <li>- Recomendaciones de clientes antiguos</li> <li>- Posicionamiento en la bolsa de metales de Londres.</li> <li>- Posicionamiento en la bolsa de Shanghai.</li> </ul>	
<b>Estructura de costos</b>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Se compone de costos directos e indirectos que involucran: remuneraciones, equipamiento, oficina, instalación de faenas, bodega, equipos menores y herramientas.</li> <li>- Gastos generales y costos financieros, relacionado a IVA e impuestos asociados a la extracción y exportación de minerales</li> </ul>		<b>Fuentes de ingreso</b>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Contratos de venta de concentrado de cobre y derivados de largo plazo.</li> </ul>		

(Figura 16: CANVAS Modelo de Negocios de MLP, Fuente: Propia).

### 3.3 Diagnóstico de la Situación Actual

Actualmente el área de transporte tiene problemas en el cumplimiento en su disponibilidad, lo que genera pérdidas en el movimiento de mineral y estéril desde la mina a chancado y hacia los botaderos respectivamente:



(Figura 17: Gráfico de disponibilidad física mensual flota CAEX, Fuente: Propia).

Según lo visto en el gráfico de la figura 17, la baja disponibilidad física de la flota de CAEX nota una tendencia de no cumplimiento a partir de agosto 2021. Esta baja en

disponibilidad genera un promedio de 2,0 a 2,9 camiones adicionales fuera de servicio, llegando a un total de 9,9 CAEX fuera, versus los 7 equipos fuera de servicio como máximo que están establecidos para cumplir el plan de extracción. La siguiente tabla muestra la afectación de indisponibilidad versus los equipos fuera de servicio:

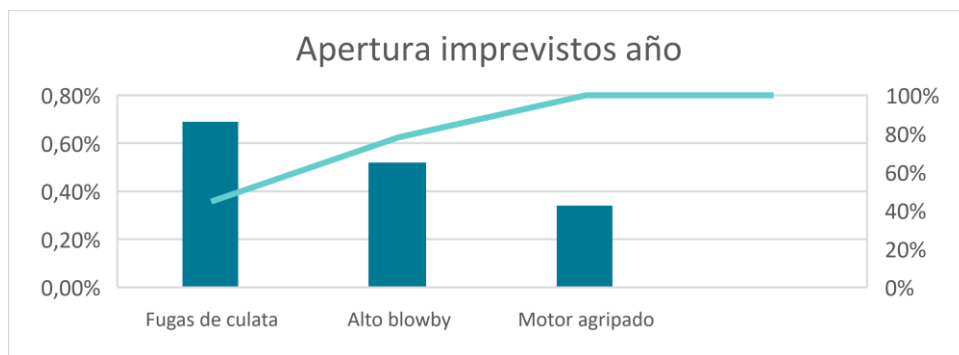
*Tabla 5: Análisis de equipos fuera de servicio.*

Mes	ene-21	feb-21	mar-21	abr-21	may-21	jun-21	jul-21	ago-21	sept-21	oct-21	nov-21	dic-21
Días / mes	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Cantidad CAEX	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
Disponibilidad [%]	85,4%	85,7%	85,9%	86,2%	86,3%	84,9%	85,6%	83,2%	84,0%	84,5%	84,0%	84,7%
Utilización [%]	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
Horas de uso / mes	445	403	447	434	449	428	446	433	423	440	423	441
Prom. CAEX F/S por plan	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Prom. CAEX F/S real	7,0	7,1	7,1	7,1	7,1	7,0	7,0	9,9	9,3	9,1	9,3	9,0
CAEX Adicionales F/S	0	0	0	0	0	0	0	3	2	2	2	2

Se corrobora en la tabla 2, que la indisponibilidad de flota cuando fluctúa por debajo del 85%, se adicionan 2 CAEX fuera de servicio, entre septiembre y diciembre a la operación llegando a un total de 9 CAEX. En el mes de agosto-21 se llegó a un peak de 3 camiones adicionales fuera de servicio, teniendo 10 CAEX fuera de servicio en la mina.

### 3.3.1 Problema(s) Identificado(s) / Oportunidad(es) identificada(s)

La identificación del problema se analizará mediante Pareto para visualizar como primera instancia que afecta esta baja disponibilidad.

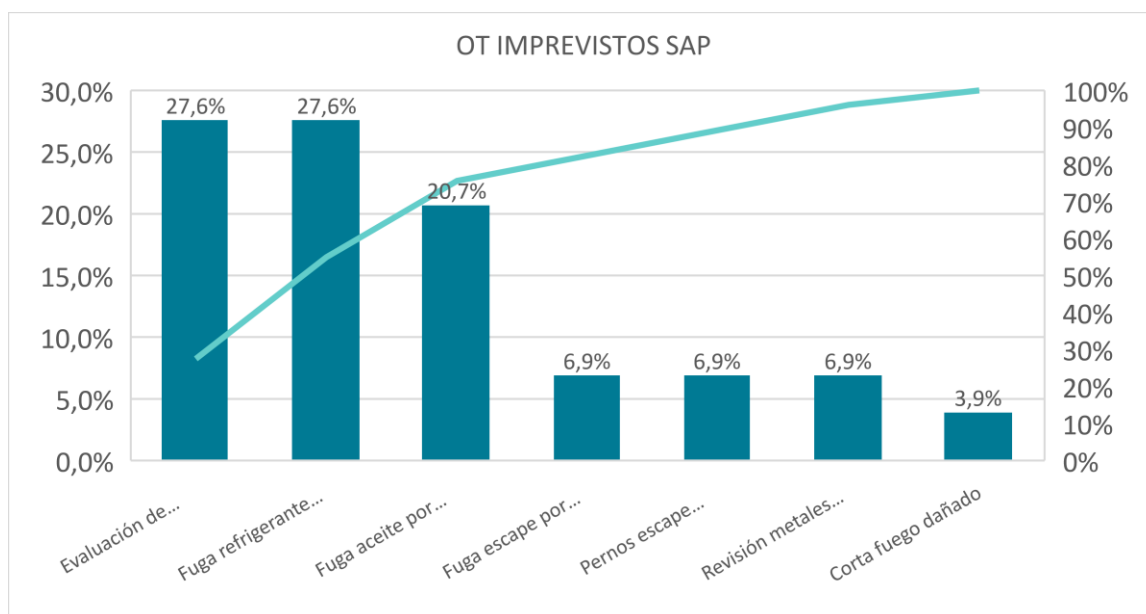


*(Figura 18: Pareto de imprevistos Flota CAEX, Fuente: Propia).*

Según el análisis de imprevistos mediante Pareto, se detecta que, a nivel de imprevistos la principal afectación tiene que ver con el sistema de motor diésel, en específico de los motores diésel de la marca Cummins, modelo QSK60. Como se evidencia en la figura 18, las principales fallas que afectan la disponibilidad son fugas de culatas, alto blowby y motor agripado.

Por otro lado, se analiza la cantidad de ordenes en SAP (ERP de mantenimiento) que se han realizado en el sistema de manera imprevista, con la finalidad de agregar más información a que sistema o subsistema estaría afectando en mayor medida estos índices de indisponibilidad.

A continuación, se muestra otro gráfico de Pareto en donde se muestran los principales imprevistos almacenados en las ordenes de trabajo (OT) en SAP<sup>3</sup> para poder visualizar donde se encuentra el foco de indisponibilidad:



(Figura 19: Pareto de imprevistos en OT SAP Flota CAEX, Fuente: Propia).

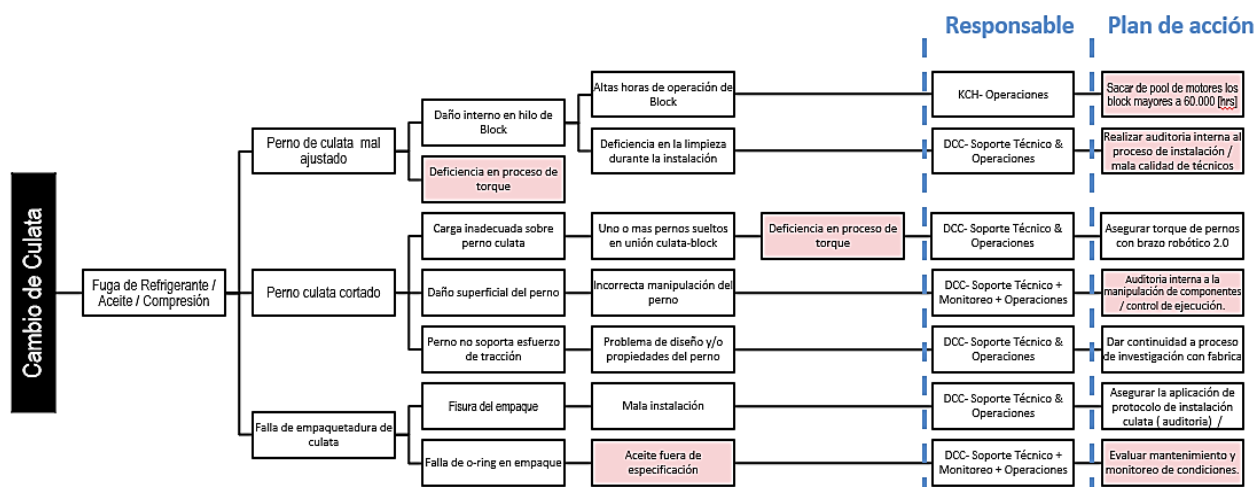
Se identifica que la principal afectación de falla en los motores diésel es por blowby<sup>4</sup> y

<sup>3</sup> SAP: ERP o software de gestión de mantenimiento.

<sup>4</sup> Tipo de falla asociada por sobre presión de Carter, normalmente causada por desgaste de anillos de pistones.

fugas de refrigerante, ambas con un 26,7% de incidencia y fugas de aceite motor por culata con un 20,7%. Los demás imprevistos, como fugas de escape por culata, pernos faltantes de escape y revisión de metales de bancada representa un 6,9% del análisis, los cuales son eventos que pasan como segunda prioridad del análisis. Resumiendo, el 55% de los imprevistos en el año 2021 obedece a fugas de culata y el 28% a alto blowby de motor.

El equipo de mantenimiento realiza los análisis causas raíz para detectar los motivos de estas fallas, llegando a las siguientes conclusiones:



(Figura 20: RCA falla fugas de refrigerante y aceite por culata, Fuente: Documento MLP).

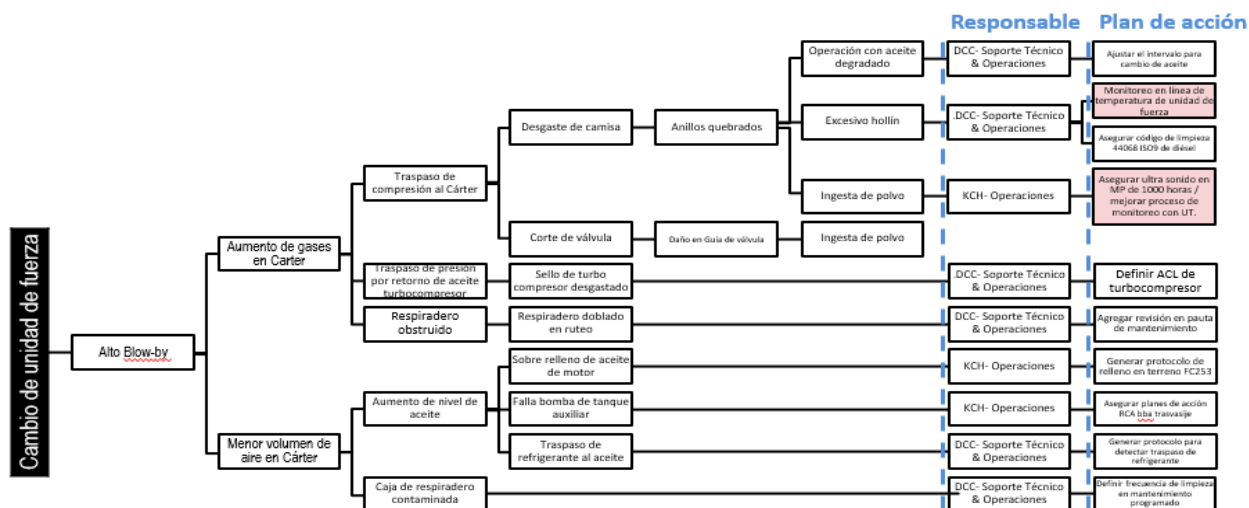


Figura 21: RCA falla alto blow by, Fuente: Documento MLP).

## Antigüedad de motores diésel:

- Las fallas de fugas de culata obedecen a envejecimiento de los principales componentes del motor: Block, cigüeñal y árbol de levas.
- El fabricante de motores Cummins, indica que blocks, cigüeñal y árbol de levas con más de 60.000 horas de uso, significa una gran pérdida de confiabilidad del componente y que no darán garantía a menos que exista un overhaul (mantenimiento mayor) de estos componentes.
- Para el 2022, existirán 15 CAEX con motores por sobre las 60.000 horas, los cuales se deben normalizar.

Tabla 6: Antigüedad Motores diésel flota CAEX<sup>5</sup>.

Cambio Modulo	2022- M1	2022- M2	2022- M3	2022- M4	2022- M5	2022- M6	2022- M7	2022- M8	2022- M9	2022- M10	2022- M11	2022- M12
CA-51	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
CA-52	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
CA-59	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CA-61	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
CA-68	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CA-73	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
CA-76	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
CA-82	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
CA-86	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CA-89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
CA-92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
CA-93	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CA-94	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CA-95	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CA-96	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
CA-98	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
CA-69	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<sup>5</sup> Celdas en color rojo representa cambio de motores por sobre 60.000 horas (11 un). En color naranja entre 40.000 y 60.000 (4 un) y en amarillo por menos de 60.000 (2 un)

### **Monitoreo de condiciones deficiente:**

- El monitoreo de condiciones (MONCON) se realiza a través de análisis de aceite como principal tarea de monitoreo. También se usa el sistema SPECTO de Cummins, que permite visualizar parámetros de temperatura, presión y otros parámetros como códigos de falla. Este sistema no es preventivo ni predictivo, más bien es correctivo, ya que la información es entregada una vez ocurrido el evento.
- Las solicitudes de MONCON en base a los análisis de aceite son certeros, pero no presentan información complementaria como vibraciones ni temperatura.
- Por otro lado, la carga de trabajo que sale de MONCON es baja, entregando poca información para que los planificadores tomen decisiones a la hora de planificar y normalizar condiciones.
- Existe actualmente el sistema de detección de parámetros de temperatura y vibraciones SPECTO, de la empresa Cummins, el cual no se está utilizando para visualizar información en tiempo real. Tampoco entrega información de carácter predictiva. El sistema tampoco entrega alertas por correo u otro medio para visualizar a tiempo las anomalías detectadas

### **Mejora continua:**

- Existen partidas en frío de los motores, lo cual es generado por una mala aplicabilidad del procedimiento por parte de los operadores.
- El congelamiento de los motores diésel producto de que los calefactores de los motores se encuentran fuera de servicio.

### **Soporte técnico:**

- Malas evaluaciones técnicas por parte de los mantenedores de la empresa CUMMINS.
- Poca capacidad técnica de los mantenedores de motores provenientes de la empresa CUMMINS.
- Especialistas de motores en el contrato son escasos, 1 por turno.
- El soporte técnico de la empresa es escaso, centralizado y trabaja en Santiago.



Los tiempos de respuestas ante fallas imprevistas de alto impacto son lentos debido al alto requerimiento a nivel nacional.

### Control de ejecución

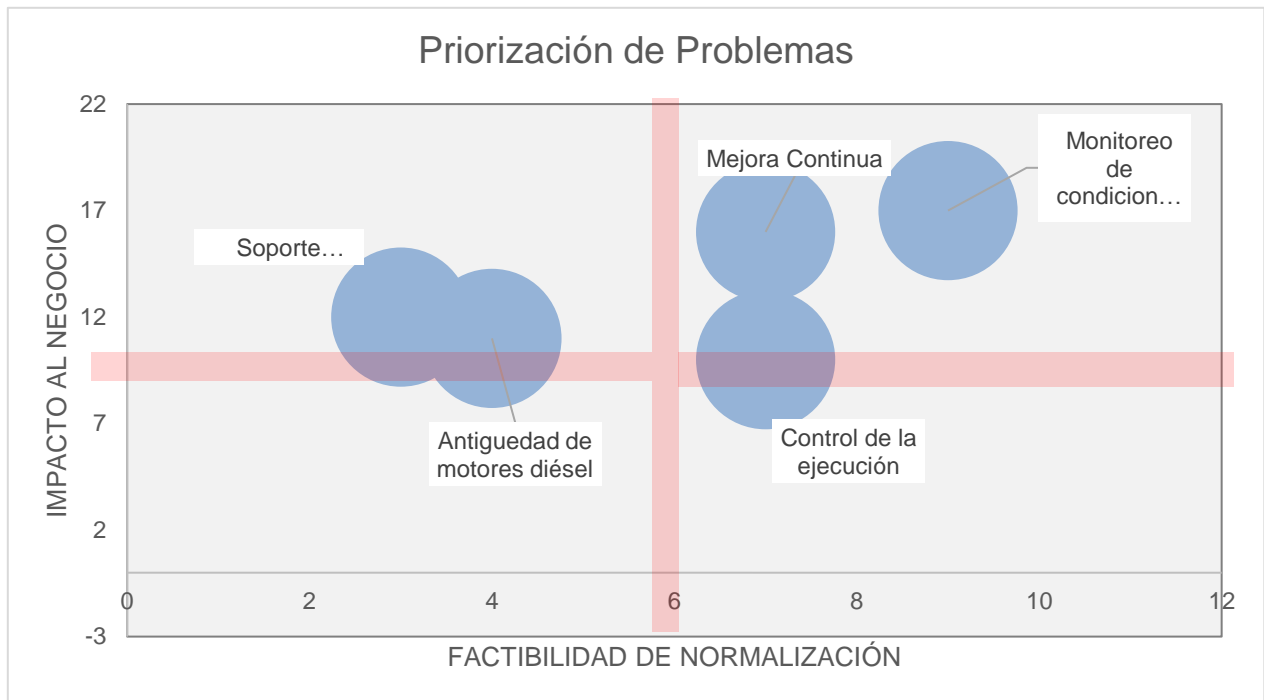
- Existen desviaciones en las mantenencias programadas. Extensiones en su duración de la atención versus lo planificado por falta de habilidades técnicas de los mantenedores.
- Existe una mala calidad de las reparaciones y mantenencias realizadas en los motores diésel.
- El nivel de órdenes de trabajo no se está atacando a tiempo producto de la falta de personal y de experticia. Esto genera un aumento de órdenes de trabajo en sistema que no se pueden atender, acumulándose en sistema, también denominado Backlog.

Se mencionaron varios problemas u oportunidades de mejora producto del análisis realizado por el área de confiabilidad. Se procede a priorizar los problemas para en base a su factibilidad de normalización, urgencia e importancia estratégica para visualizar cual es que tiene un mayor impacto para el negocio en caso de ser solucionado:

*Tabla 7: Priorización de problemas en base a factibilidad e impacto.*

N°	Problema	Factibilidad de normalización	Urgencia	Importancia estratégica	Impacto al negocio (urgencia + importancia estratégica)
1	<b>Antigüedad de motores diésel:</b> Motores diésel QSK60 por sobre las 60.000 horas.	4	9	2	11
2	<b>Monitoreo de condiciones deficiente:</b> MONCON a motores diésel se realiza solo a través de análisis de aceite / baja carga de trabajo para planificación / entrega de información de sistemas tecnológicos de forma correctiva y no predictiva.	9	9	8	17
3	<b>Mejora continua:</b> Partidas de motores en frío / congelamiento por calefactores fuera de servicio.	7	9	7	16
4	<b>Soporte técnico:</b> Experticia técnica insuficiente / malas evaluaciones técnicas / tiempos de reacción lentos por parte de Cummins Santiago.	3	7	5	12

5	<b>Control de ejecución:</b> Mala calidad en reparaciones / extensión de reparaciones producto de falta de habilidades técnicas.	7	5	5	10
---	--	---	---	---	----



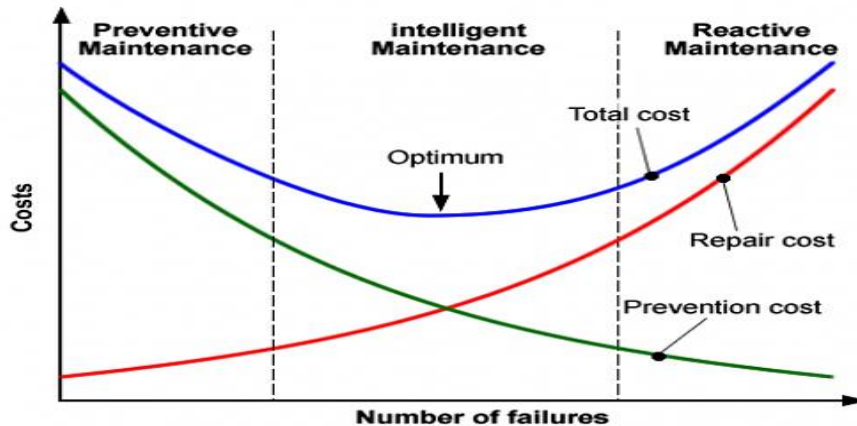
(Figura 22: Priorización de problemas en base a factibilidad e impacto, Fuente: Propia).

Según lo mostrado en la figura 22, se prioriza el **problema del monitoreo de condiciones deficiente**, esto obedece a que tiene el mayor impacto al negocio porque debido a que una posible solución se enmarcaría en el objetivo estratégico de transformación digital y uso de herramientas de la industria 4.0 (pilar estratégico de innovación) y de la excelencia operacional (pilar de competitividad). Por otro lado, en caso de solucionar este problema, logrando detectar a tiempo alguna condición catastrófica, generaría un potencial de ahorro sustancial debido a los altos costos que se producen por fallas catastróficas de motores diésel.

La factibilidad de implementar una solución, el problema tiene una solución a nivel de rediseño de proceso, con un soporte tecnológico de la industria del mantenimiento 4.0. El soporte tecnológico, ya existe, en este caso el sistema SPECTO, el cual facilita la posible implementación.

Por otro lado, a nivel de estrategia de mantenimiento, tener un proceso de monitoreo de

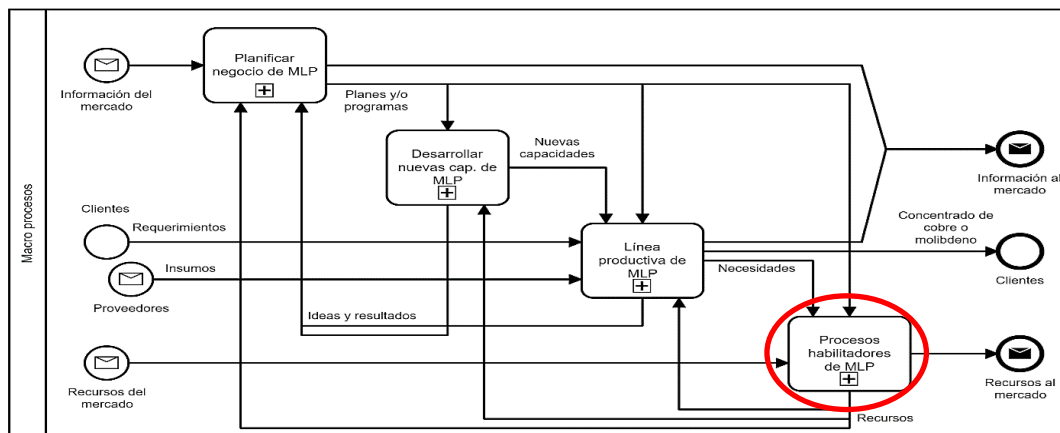
condiciones robusto asegura tener un mantenimiento predictivo eficaz (inteligente), que asegura los intervalos óptimos de intervención, reduciendo el alto costo producto de un sobre mantenimiento que viene de la mano con la realización de mucho mantenimiento preventivo o por bajo mantenimiento o reparación al imprevisto (correctivo).



(Figura 23: Tipos de estrategias de mantenimiento y sus costos, Fuente: <http://veedor.es/conoces-los-costes-del-mantenimiento/>).

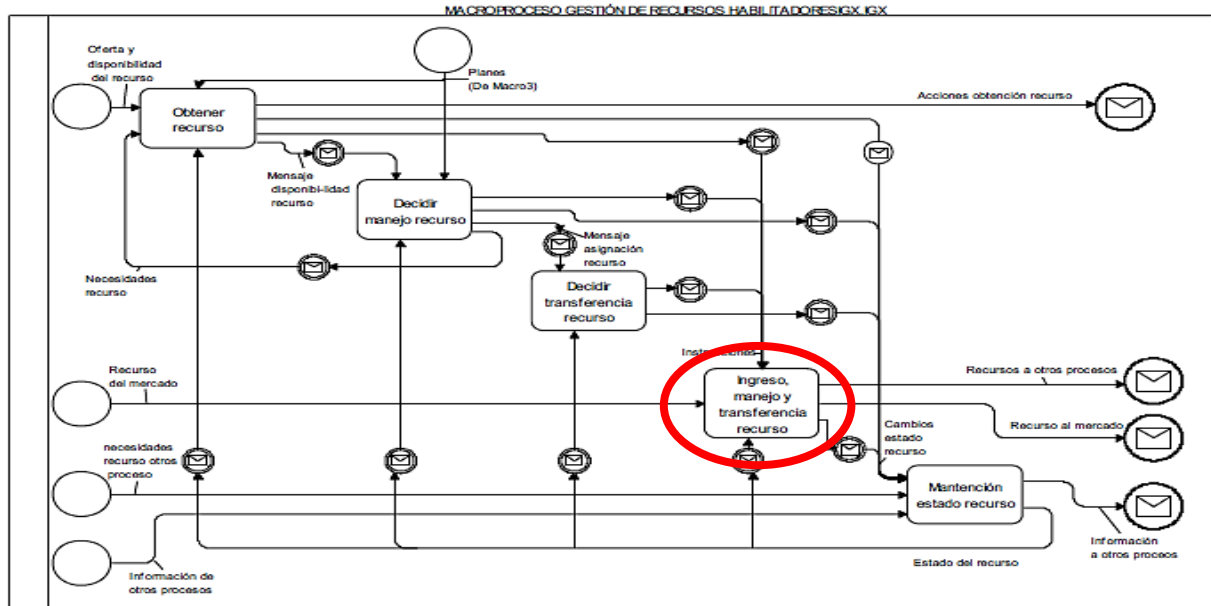
### 3.3.2 Arquitectura de Procesos AS IS

Para describir la arquitectura de procesos en la que está inserta el problema, ocuparemos las macros de Oscar Barros, Barros O. (2000). A continuación, se visualiza el Patrón de arquitectura diversificada para el área de mantenimiento mina. Cabe destacar que esta área es considerada de soporte y apoyo para la extracción de mineral y producción de cobre, la cual sería la cadena de valor. Macro N°4:



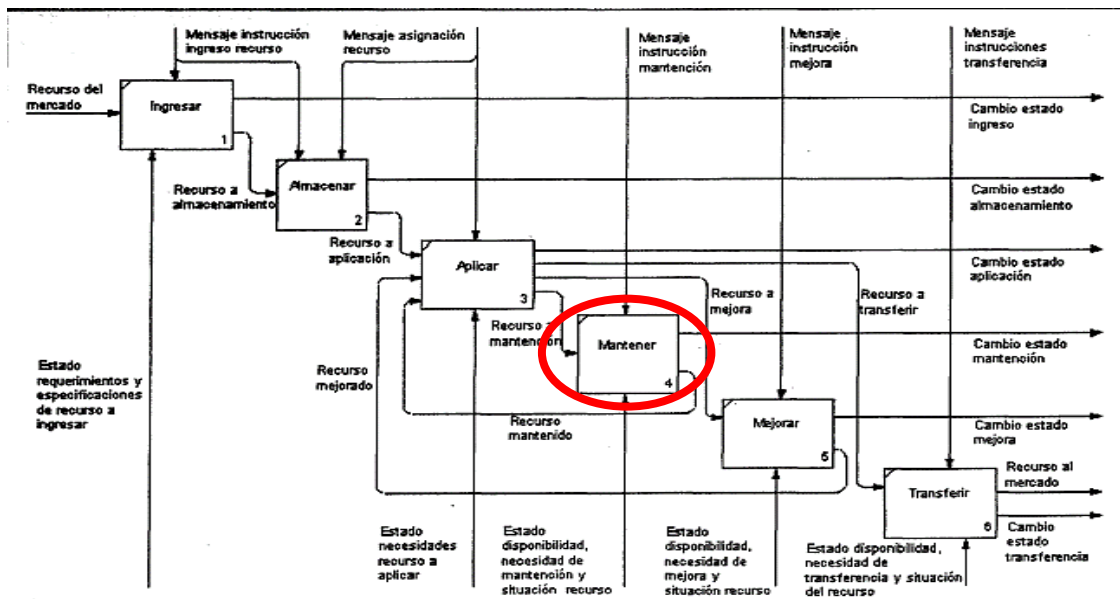
(Figura 24: Patrón de proceso del área de mantenimiento Macro N°4, Fuente: Barros O.

Se muestra el detalle de la macro N°4, en donde se instancia el proceso de ingreso, manejo y transferencia de recursos (macro N°4.4):



(Figura 25: Patrón de proceso del área de mantenimiento Macro N°4.4, Fuente: Barros O.)

El proceso en donde se aplicará la Ingeniería de Negocios será en el proceso de mantenimiento (macro N°4.4.4), como se muestra a continuación:

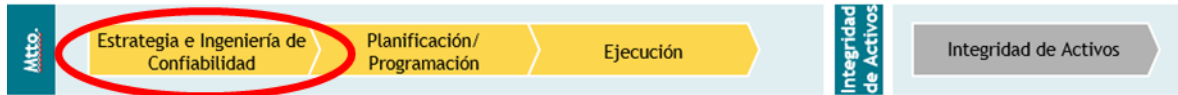


(Figura 26: Patrón de proceso del área de mantenimiento Macro N°4.4.4, Fuente: Barros O.)

Dentro de esta área de llamada “mantener”, se encuentra el mantenimiento de activos físico de la compañía. Dentro de él existen 3 subprocesos, las cuales son estrategia e

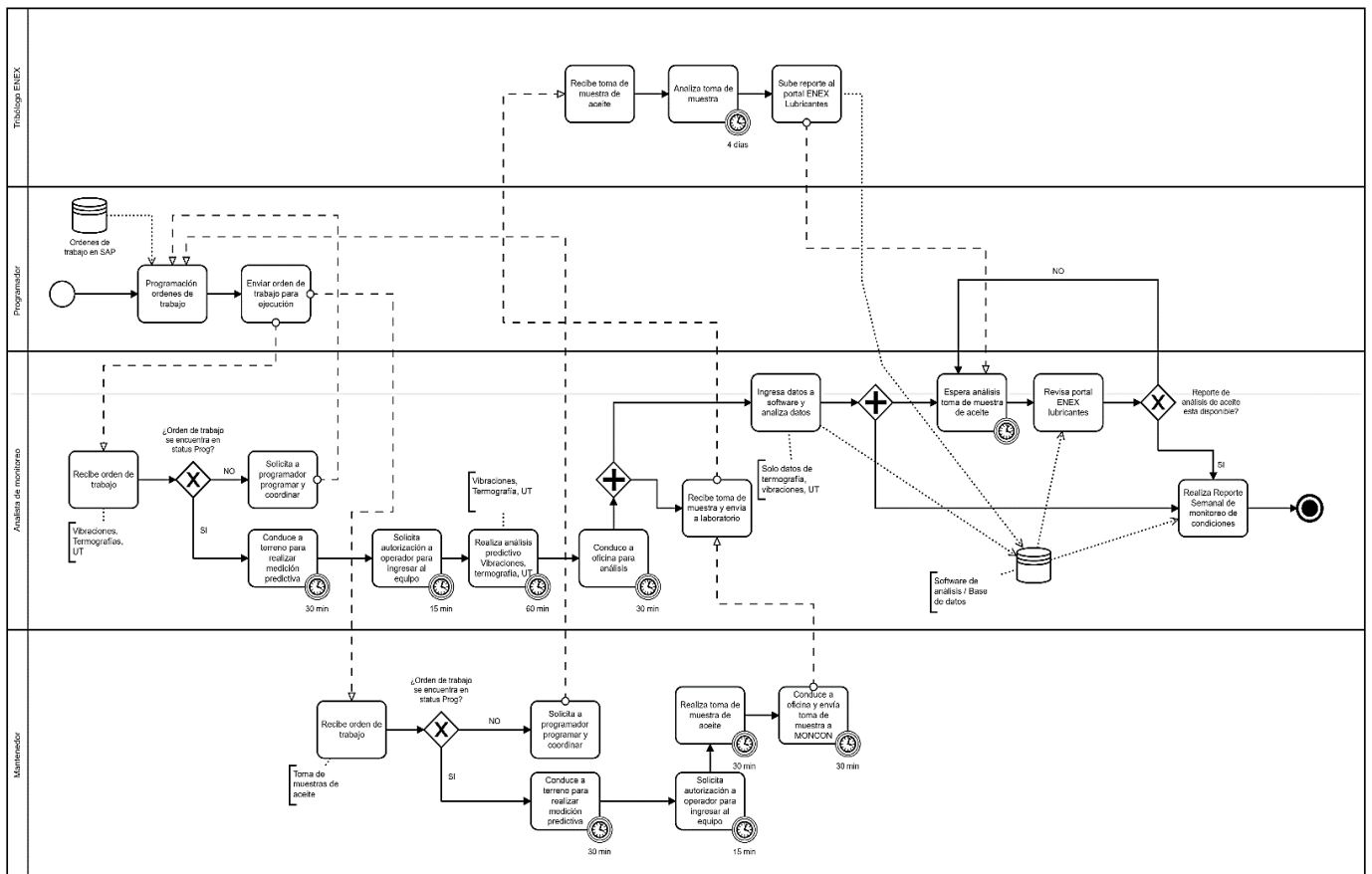
ingeniería de confiabilidad, planificación / programación y ejecución del mantenimiento.

El área de monitoreo de condiciones, en donde se desarrollaría el proyecto, se encuentra dentro del área de ingeniería de confiabilidad:



(Figura 27: Área de la gerencia de mantenimiento donde se ubica MONCON., Fuente: Documento interno MLP.)

### 3.3.3 Modelamiento Detallado de Procesos AS IS



(Figura 28: Diagrama AS-IS de proceso de monitoreo de condiciones Fuente: Propia<sup>6</sup>)

<sup>6</sup> Para revisar desde CAWEMO: <https://cawemo.com/diagrams/b061d5b7-9bb0-4003-8bbd-f9f360b0f66b--new-bpmn-diagram?v=920,19,0.35>

### 3.4 Cuantificación del Problema u Oportunidad

Se mostrará cuantitativamente la afectación en movimiento de tonelaje en la mina producto de tener de 2 a 3 CAEX menos por fallas catastróficas en motores diésel:

Tabla 8: Pérdidas de tonelaje por indisponibilidad.

Mes	ene-21	feb-21	mar-21	abr-21	may-21	jun-21	jul-21	ago-21	sept-21	oct-21	nov-21	dic-21
Días / mes	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Cantidad CAEX	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
Disponibilidad [%]	85,4%	85,7%	85,9%	86,2%	86,3%	84,9%	85,6%	83,2%	84,0%	84,5%	84,0%	84,7%
Utilización [%]	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
Horas de uso / mes	445	403	447	434	449	428	446	433	423	440	423	441
Ton nominales / CAEX	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310
Tiempo de ciclo [horas]	0,51	0,63	0,57	0,55	0,42	0,46	0,52	0,55	0,53	0,58	0,63	0,68
Ciclos / mes	872	640	785	790	1070	930	857	788	799	759	672	649
Tonelaje movido / CAEX	270.346	198.367	243.305	244.871	331.737	288.365	265.768	244.227	247.626	235.213	208.320	201.098
Prom CAEX F/S por plan	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Prom CAEX F/S real	7,0	7,1	7,1	7,1	7,1	7,0	7,0	9,9	9,3	9,1	9,3	9,0
CAEX Adicionales F/S	0	0	0	0	0	0	0	3	2	2	2	2
Pérdida de tonelaje	-8.906	11.435	18.033	24.199	35.515	2.375	13.132	708.258	574.492	498.652	481.219	396.163
Tonelaje Anual [Ton]	147.782.000											
Tonelaje Anual Perdido[Ton]	2.549.937											
% Afectación	1,7%											

Como se aprecia en la tabla 8, en los meses en donde la disponibilidad de la flota ha estado por sobre la requerida por el plan, de 85%, se generan ganancias en el movimiento mina (números negativos en color verde), pero al tener baja disponibilidad, se observa que la falta de equipos genera pérdidas en el movimiento del tonelaje requerido (números positivos en color rojo). Se calcula que esta indisponibilidad en el año generó pérdidas cercanas a los 2,6 millones de toneladas anuales, lo que incluye mineral y estéril, lo que representa un 1,7% del tonelaje total planificado en la mina para el 2021.

## **CAPITULO 4: PROPUESTA DE REDISEÑO**

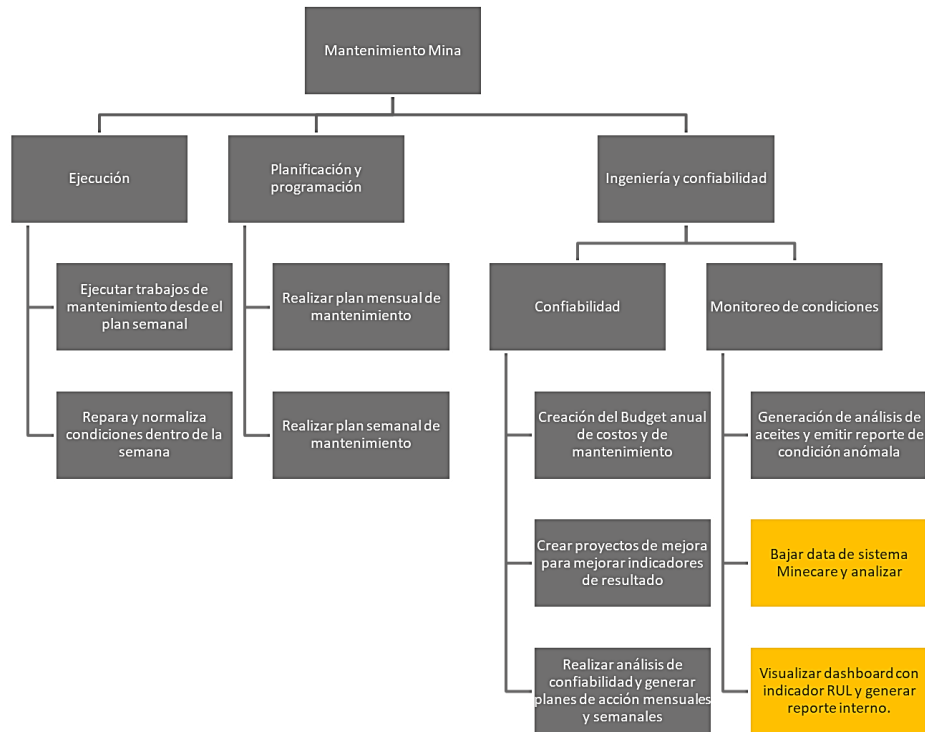
### **4.1 Direcciones de cambio y alcances**

Para poder implementar la solución a la problemática planteada, se propone la incorporación del apoyo tecnológico al proceso actual de monitoreo de condiciones para poder cumplir el objetivo general planteado.

El objetivo es el aumento de la disponibilidad de la flota de CAEX mediante la detección oportuna de imprevistos de largo aliento en motores diésel. El único proceso actual de mantenimiento que podría realizar dicha actividad es el área de monitoreo de condiciones, esto debido a que actualmente manejan técnicas predictivas de mantenimiento como la de análisis de aceite y que, potenciado con la implementación de esta propuesta tecnológica y la analítica avanzada, se cree que será posible predecir de mejor manera estas fallas en dichos componentes

#### **4.1.1 Procesos claves**

En la figura 29, se muestra el árbol de todos los procesos involucrados de la gerencia de mantención mina enfocado solo en el mantenimiento de camiones de extracción. En el proceso actual de monitoreo de condiciones se agregará la propuesta tecnológica, los cuadros de color naranja muestran las actividades nuevas que requieren ser implementadas.



(Figura 29: Árbol de procesos a rediseñar, Fuente: Propia).

En el proceso de monitoreo de condiciones, en donde actualmente solo se realizan análisis de aceite, mediante la técnica de tribología, se incorporarán dos actividades, la primera es bajar la data de los motores diésel detectada por SPECTO y analizarla para alimentar el dashboard. Por otro lado, se debe generar el reporte interno semanal, o diario de ser requerido, a las áreas de planificación y ejecución que indique el equipo, el RUL y la anomalía detectada.

La principal diferencia entre la situación actual y la rediseñada radica en que se agrega una nueva técnica predictiva para tomar una decisión sobre el motor diésel de los camiones de extracción. Se agrega la predicción de una falla por medio de data recogida del mismo componente y no depender de solo el análisis de aceite que se realiza actualmente. La recopilación de la data y el reporte interno tendrá que ser realizado por personal de monitoreo de condiciones ya contratado y actual administrador de la base de datos SPECTO.



## 4.1.2 Variables de diseño

En este apartado se plantean las siguientes variables de diseño con la finalidad de dar una estructura lógica al rediseño. Las variables consideradas son las de anticipación, prácticas de trabajo, coordinación, asignación de responsabilidades, apoyo computacional e Integración de procesos conexos, las cuales se detallan a continuación:

### 4.1.2.1 Anticipación

Esta variable es la más importante para cumplir con el objetivo general del proyecto, debido a que la propuesta de rediseño tiene que evitar o prevenir una falla catastrófica como una fuga por culata o una falla de alto blow-by en los motores diésel.

*Tabla 9: variable anticipación.*

Anticipación	Situación Actual	Proyecto
Detectar fallas catastróficas en los motores diésel.	Mantenimiento programado C/ 500 horas (cambio de aceite y filtros)  Monitoreo de aceite mediante análisis tribológico.	Incorporar al monitoreo la medición de presión y temperatura de gases y aceite de entrada / salida.  Crear mediante herramienta tecnológica y machine Learning la detección de anomalías.

### 4.1.2.2 Prácticas de trabajo

En esta variable se deben realizar los rediseños con la finalidad de incorporar una nueva actividad que realizará el personal técnico de monitoreo de condiciones de la mina. Esta actividad tendrá la finalidad de analizar, la data, incorporarla al dashboard y realizar el reporte semanal proveniente de la herramienta tecnológica.

Tabla 10: Variable práctica de trabajo.

Práctica de Trabajo	Situación Actual	Proyecto
Reportabilidad anticipada de condición catastrófica.	Realización de reporte en base a análisis de aceite (tribología)	Incorporar al reporte tribológico actual el reporte semanal, o diario de ser necesario, que muestre anomalías en presión, temperatura e indicador RUL (tiempo restante ante una falla).
Comunicación oportuna de anomalías en motores diésel.	No	Incorporar al área de operaciones, en la reunión diaria de coordinación, las condiciones críticas con RUL menor a 4 días para bajar equipo CAEX a taller.
Desempeño y control de la información	No	Registro real de presiones y temperatura de los motores diésel, con capacidad de predecir un imprevisto de largo aliento.

#### 4.1.2.3 Coordinación

Debido a que operan dos gerencias, la de mantenimiento y la de operaciones en la gestión del activo físico, es importante formalizar el canal de comunicación, las alarmas ante una anomalía y los criterios que se utilizarán para realizar o una inspección en terreno o bajar el equipo a taller para su revisión en profundidad.

*Tabla 11: Variable coordinación.*

<b>Coordinación</b>	<b>Situación Actual</b>	<b>Proyecto</b>
Reglamento interno	Actualmente no existe algún reglamento que indique que hacer en caso de detectar alguna anomalía en el motor diésel. Queda al criterio del supervisor de turno cuando inspección el equipo.	Crear procedimiento que indique qué realizar y cuantos días tiene disponible para inspección un equipo cuando se muestre una anomalía ya sea por análisis de aceite o por detección de anomalías de la herramienta tecnológica.
Organización / jerarquía	Actualmente existen los cargos y las jerarquías necesarias para tomar la decisión sobre el equipo.	Mantener situación actual.
Colaboración	Actualmente existe la colaboración entre equipos para tomar decisiones sobre el equipo y para el cuidado del activo físico.	Mantener situación actual.

#### **4.1.2.4 Asignación de responsabilidades**

Esta variable es de suma importancia debido a que el personal actual que trabaja en el área de monitoreo de condiciones deberá incorporar una nueva actividad a su rutina laboral que involucrará el generar el análisis de la data desde SPECTO y emitir el reporte semanal / diario.

*Tabla 12: Variable asignación de responsabilidades.*

<b>Asignación de responsabilidades</b>	<b>Situación Actual</b>	<b>Proyecto</b>
Creación de reporte de Monitoreo de condiciones	Personal MONCON genera reporte de variables operacionales del equipo.  Personal empresa SPM analiza las muestras de aceite y emite reporte cuando existe anomalía.	Mantener situación actual agregando que mismo personal MONCON debe baja data de su sistema SPECTO y entrena modelo predictivo que alimentara dashboard e indicadores: RUL, anomalía detectada.

#### 4.1.2.5 Apoyo computacional

En este caso involucra mantener una base de datos proveniente del sistema SPECTO y hacer posible la generación de predicciones de anomalías mediante técnicas de Machine Learning y el pronóstico de la vida útil remanente o RUL.

*Tabla 13: Variable apoyo computacional.*

<b>Apoyo Computacional</b>	<b>Situación Actual</b>	<b>Proyecto</b>
Ingreso actual a la base de datos de motores diésel	Existe el mismo sistema SPECTO que permite el ingreso de la data.	Mantener situación actual.
Reportabilidad y predicción	No	Implementar la herramienta con algoritmo de machine Learning usando el mismo sistema SPECTO de Cummins.

#### 4.1.2.6 Integración de procesos conexos

Esta variable implica que el proyecto debe ejecutarlo los procesos de mantenimiento y de operacional por igual, de manera integrada, con la finalidad de cumplir con el objetivo del proyecto.

*Tabla 14: Variable Integración de procesos conexos.*

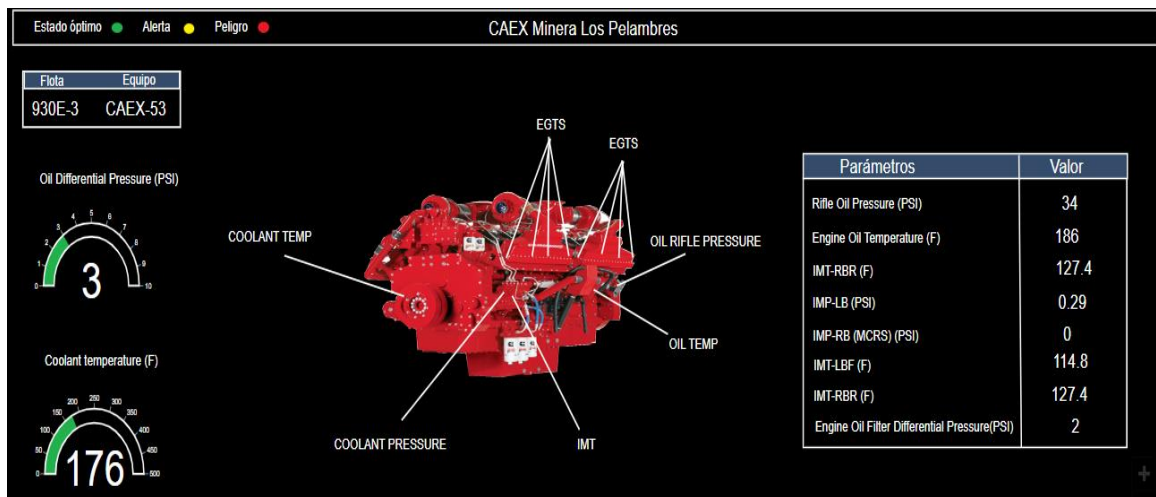
<b>Integración de procesos conexos</b>	<b>Situación Actual</b>	<b>Proyecto</b>
Operaciones y mantenimiento como procesos aislados	No, pero existen mejoras	Crear procedimiento que indique los días necesarios y que flujo de acciones se deben tomar cuando existe

		una alarma o anomalía.
Procesos perteneces a una macro	No	El proceso de mantenimiento se integrará como subproceso al área de operaciones (cadena de valor) para articular la toma de decisiones.

## 4.2 Propuesta de Solución

La propuesta de solución es la incorporación del soporte tecnológico al actual proceso de monitoreo de condiciones, siendo más específico, el agregar al proceso la generación de reportabilidad del estado actual de los motores diésel mediante la utilización de un dashboard que utilizará algoritmos de machine Learning que podrán dar alerta temprana a anomalías no detectadas a través de los análisis de aceite. Estas alertas tempranas podrán ser detectadas debido a que el motor diésel, a través del sistema SPECTO, está sensorizado en diferentes puntos estratégicos del motor y que tienen la finalidad de conocer los signos vitales del componente. Esta data de presiones y temperaturas al ser recopilada, filtrada y entrenada con algoritmos de machine Learning, nos permitirá reconocer perturbaciones o “anomalías” que no son habituales en un motor y que no pueden ser detectadas al ojo humano a través de una inspección visual o a través del mismo análisis de aceite. Por otro lado, se pretende agregar el indicador RUL o por sus siglas en inglés, Remaining useful life (vida remanente del componente), el cual define cuántos días el motor diésel podría presentar una falla relacionada con las variables sensorizadas. Dicho RUL puede ser calculado mediante distintos algoritmos de regresión lineal, multi lineal o inclusive con redes neuronales. En este apartado, se verificará que algoritmo, en base a la data obtenida, tiene un menor porcentaje de error al ser utilizado.

A continuación, se muestra como el sistema SPECTO muestra la información de los motores diésel y en qué puntos está sensorizado el componente:



(Figura 30: Sensores en motores diésel, fuente: Insite Cummins)

Como se muestra en la imagen, el motor diésel está sensorizado en 6 puntos críticos, los cuales se explican a continuación:

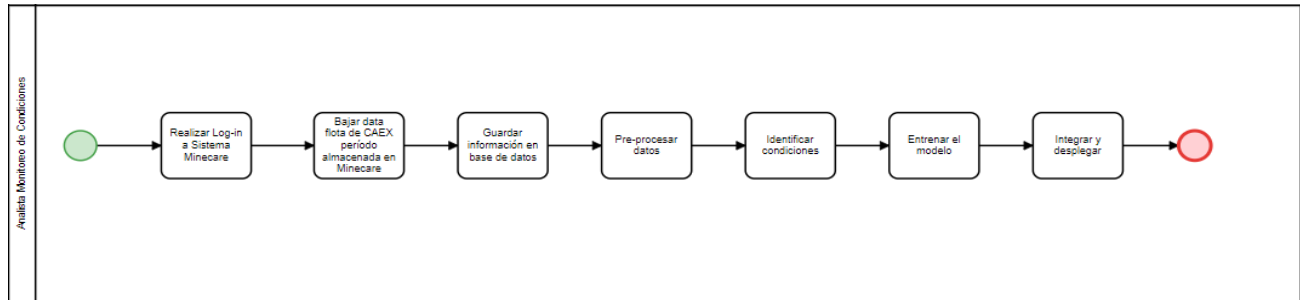
- OIL TEMP: temperatura de salida de aceite.
- OIL RIFLE PRESSURE: Presión de salida de aceite.
- IMT: Temperatura manifold entrada aceite.
- EGTS: Sensores de gases de escape.
- COOLANT TEMP: Temperatura refrigerante.
- COOLANT PRESSURE: Presión de refrigerante.

Estas variables de presión y temperatura se van almacenando en la base de datos del sistema SPECTO, el cual es de propiedad de Minera los Pelambres y administrado por la empresa Cummins S.A. Dicha información será la base para poder entrenar el modelo predictivo y posterior generación de reportes.

#### 4.2.1 Modelamiento detallado de procesos TO BE (BPMN)

A continuación se muestran los rediseños realizados a los procesos actuales dentro del área de monitoreo de condiciones:

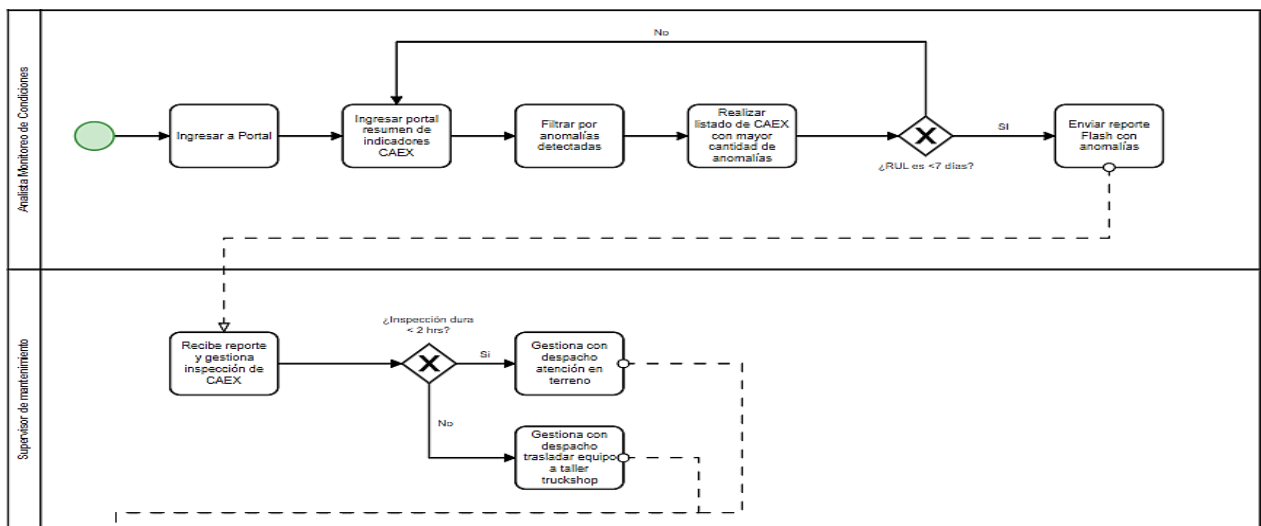
#### 4.2.1.1 Bajar data de sistema SPECTO y analizar



(Figura 31: Bajar data de sistema SPECTO y analizar, fuente: propia)

Este proceso parte con el analista de Monitoreo de condiciones accediendo al sistema SPECTO ya instalado e implementado en medición en toda la flota de camiones de extracción. Luego con su clave y contraseña ingresa a su perfil de usuario para descargar en formato .CSV lo almacenado en un periodo de tiempo definido, el cual puede ser de días hasta meses de data de presiones, temperaturas de gases y aceite de entrada y salida del motor diésel. La data luego debe ser guardada en la base de datos que se irá enriqueciendo con el pasar del tiempo en el disco compartido de la empresa, la cual servirá para alimentar y mejorar cada vez más el modelo predictivo de fallas. Finalmente, el modelo es entrenado por el analista siguiendo los siguientes pasos: pre-procesar y limpiar data, identificar condiciones, entrenar el modelo y desplegar.

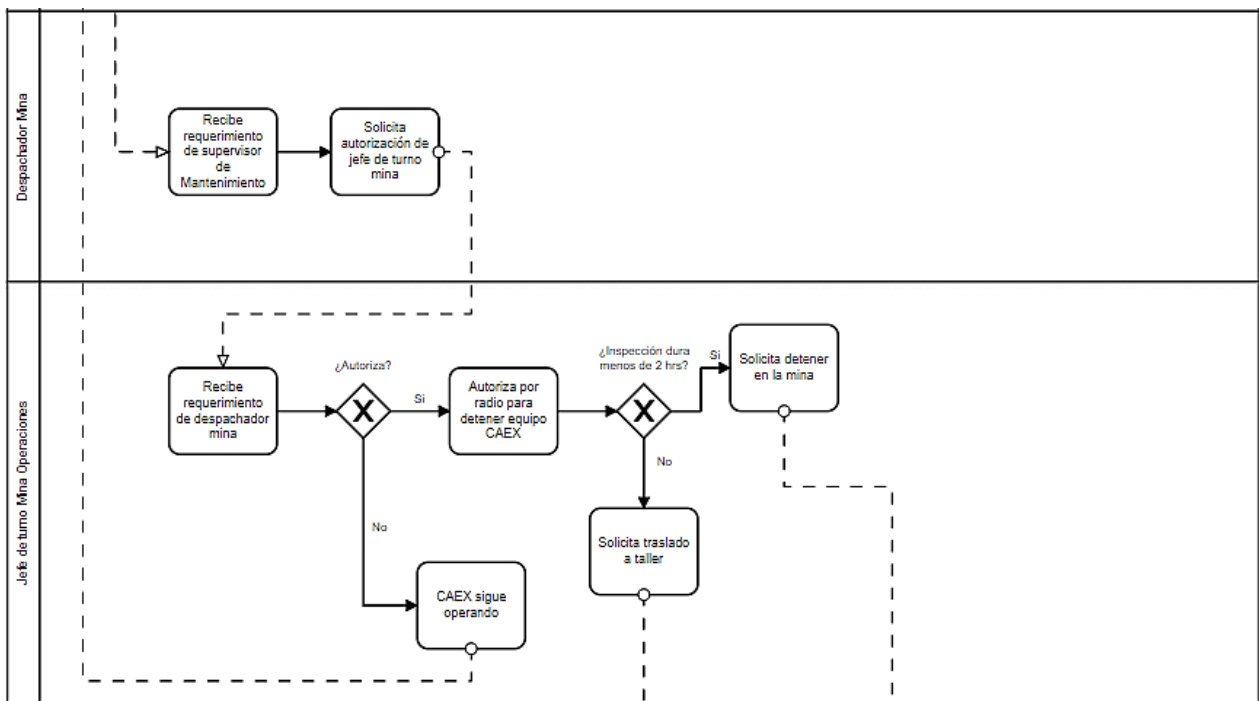
#### 4.2.1.2 Visualizar dashboard con indicador RUL y generar reporte interno.



(Figura 32: Visualizar dashboard con indicador RUL y generar reporte interno, fuente: propia)

Respecto a este proceso, se centra en la visualización de la data y la obtención de indicadores como el RUL y de las anomalías detectada para generar el reporte que será enviado a las distintas áreas involucradas y que harán gestión en el camión de extracción.

En este proceso se evidencia que el técnico de monitoreo de condiciones ingresará al portal y revisará que camión de extracción tiene anomalías detectadas y generará reporte de evento inmediato o llamado reporte flash, el cual tendrá un RUL o tiempo de vida estimado menor a 7 días. Luego el supervisor de mantenimiento recibirá el reporte y solicitará la inspección del equipo dentro de su turno de 7 días al despachador mina, que, a su vez solicitará autorización al jefe turno mina quién coordinará y autorizará la detención del equipo. Si la inspección dura menos de dos horas, el equipo se tomará en terreno, si dura más de dos horas, se deberá bajar a taller para su inspección técnica.

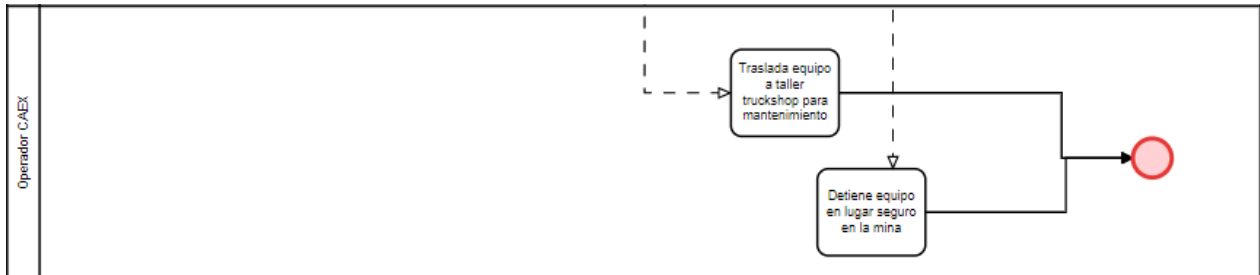


(Figura 33: Visualizar dashboard con indicador RUL y generar reporte interno, fuente: propia)

Finalmente, el jefe de turno mina es quien da la orden al operador de detener o trasladar el equipo al taller para su inspección. Cuando el equipo llega a destino pasa a ser de



responsabilidad de mantenimiento su atención oportuna y entrega, Equipo queda con código “inspección motor diésel preventiva”.



(Figura 34: Visualizar dashboard con indicador RUL y generar reporte interno, fuente: propia<sup>7</sup>)

#### 4.2.2 Diseño de lógica de negocios

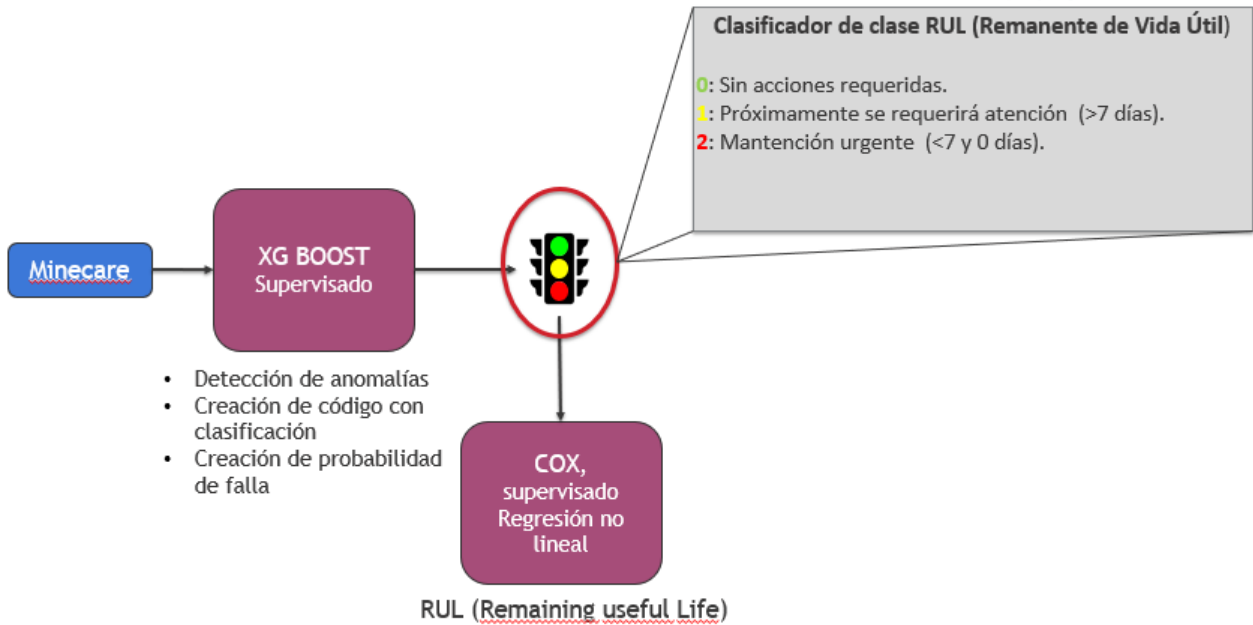
La lógica de negocios del proyecto tiene relación con la obtención de data, el pre-procesado, la identificación de anomalías y el entrenamiento del modelo para integrar y desplegar la información obtenida. Para este proyecto se tiene pensado utilizar 2 algoritmos supervisados de Machine Learning para obtener el resultado, primero se utilizará el algoritmo XG Boost, o por su nombre completo Extreme Gradient Boosting, el cual es el algoritmo de machine learning mas utilizado en la actualidad, ya que caracteriza por obtener buenos resultados predictorios con minimo esfuerzo mediante la confección de modelos de árbol de decisión debiles que se van iterando hasta rebustecerse y minimizar el porcentaje de error (Vega, 2020). Este algoritmo puede ser ocupado tanto para clasificar como para regresiones de data sets grandes por sobre los 1000 datos el cual aplicaría a nuestro proyecto. En este caso requeriremos la clasificación para detectar anomalías en la data.

Por otro lado, para la obtención del RUL del motor, realizaremos el análisis a través de

<sup>7</sup> <https://cawemo.com/diagrams/b061d5b7-9bb0-4003-8bbd-f9f360b0f66b--new-bpmndiagram?v=722,2575,0.741>

un algoritmo supervisado de regresión, en este caso a través de la regresión de COX.

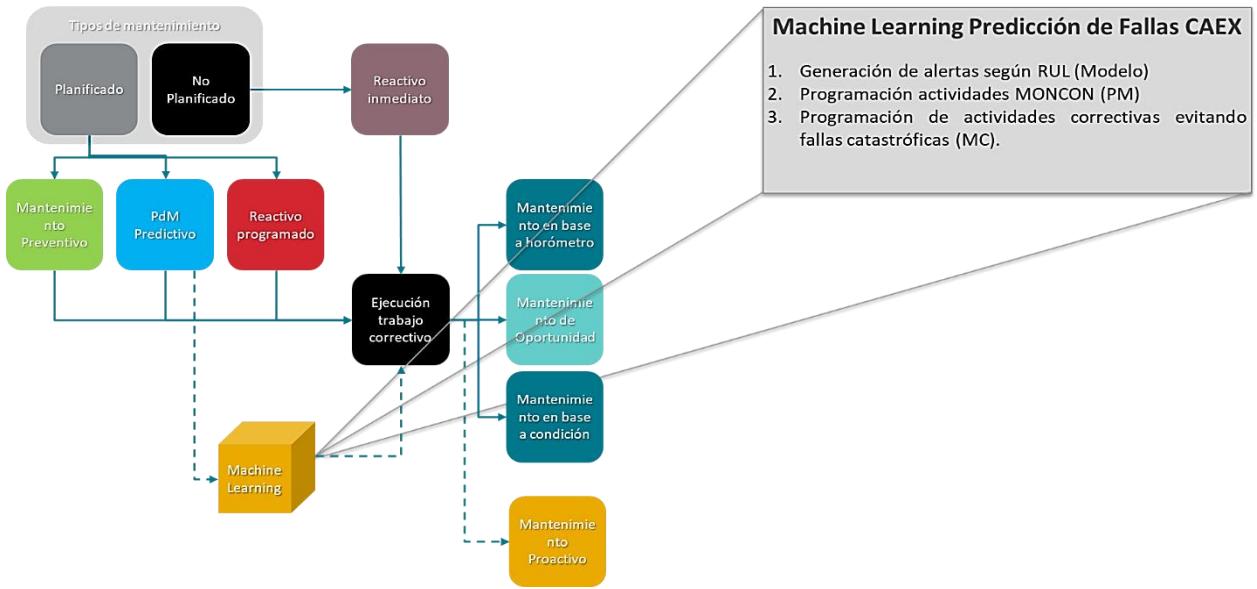
A continuación se muestra un resumen de la lógica:



(Figura 35: Resumen lógica de negocios y obtención de resultado, fuente: propia)

#### 4.2.2.1 Integración a la Estrategia de mantenimiento

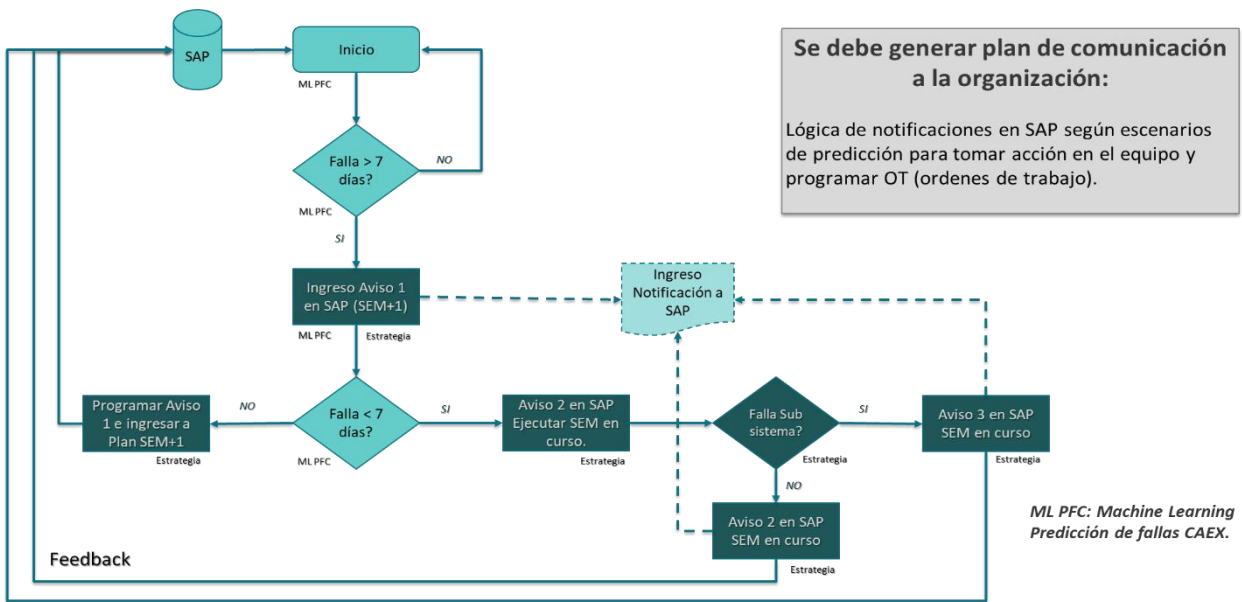
El proyecto tendrá directa integración con nuestra estrategia de mantenimiento, a dicha estrategia se le sumara un nuevo tipo de mantenimientos a los ya actuales: preventivos, predictivo y reactivos programados e inmediato, a uno de tipo de mantenimiento proactivo. Este tipo de mantenimiento, a través e la data generada por el proyecto, dará la posibilidad de programar actividades correctivas a través de un plan semanal, evitando la falla. A continuación se muestra en resumen como este proyecto se integra con la actual estrategia de mantenimiento:



(Figura 36: Integración con actual estrategia de mantenimiento, fuente: propia)

Este nuevo tipo de estrategia de mantenimiento requerirá una nueva lógica de planificación, la cual tendrá énfasis en la incorporación de avisos para ser programados en sistema SAP. La lógica de negocio indica que si el RUL reportado por el area de monitoreo de condiciones es menor a 7 días, la actividad deberá generar un aviso en SAP para ejecutarlo dentro de la semana del turno del supervisor de mantenimiento. Por otro lado si el RUL es mayor a 7 días, la actividad será tomada por el planificador y será programada en inspección de los próximos planes.

A continuación se muestra el resumen de la lógica indicada y como se integrará con nuestro sistema SAP para la correcta ejecución de los trabajos de inspección, ya sea en terreno o en taller:



(Figura 37: Integración con actual estrategia de mantenimiento en SAP, fuente: propia)

## **CAPITULO 5: PROPUESTA DE APOYO TECNOLÓGICO**

### **5.1 Arquitectura Tecnológica**

#### **5.1.1 Requerimiento de la solución**

##### **Problema:**

Crear un sistema con interfaz gráfica, con acceso online y con capacidad de generación de reportes, el cual pueda acceder en tiempo real a la base de datos generada por la sensorización del sistema SPECTO y entrenar la data para entregar 2 resultados: una anomalía y un indicador RUL.

##### **User Story:**

- Como supervisor de mantenimiento quiero saber el estatus de los motores diesel de la flota de CAEX.
- Como jefe de la mantención del equipo, quiero tener reportes ejecutivos semanales de las condiciones de los motores diésel y su RUL.
- Como jefe de turno mina, quiero tener los reportes ejecutivos semanales que me indiquen la condición de los motores diésel de la flota de CAEX.

##### **Requerimientos funcionales:**

- Interfaz de usuario en la web, el cual muestre un tablero de control: gráfico con la cantidad de anomalías en una tabla resumen con fecha y hora de evento, indicador de desempeño RUL.
- En la misma interfaz mostrar grafico con data obtenida de los 6 sensores del sistema.

- Generación de reportes serán emitidos de con información semanal o diaria, según el tipo de consulta que el usuario solicite.
- Indicar eventos relevantes de la semana.
- Cuando el sistema detecte una anomalía el sistema almacenará el evento en la base de datos, para ser consultada más adelante.

### **Requerimientos no funcionales:**

- Clave de acceso y usuario requeridos para N cantidad de usuarios.
- Seguridad de información solo visible para la compañía con cláusulas de confidencialidad para no entregar dicha información almacenada a la competencia.
- El sistema debe aguantar la transacción de N usuarios al mismo tiempo.
- Debe estar disponible 24/7, sin restricción de la red que se utilice

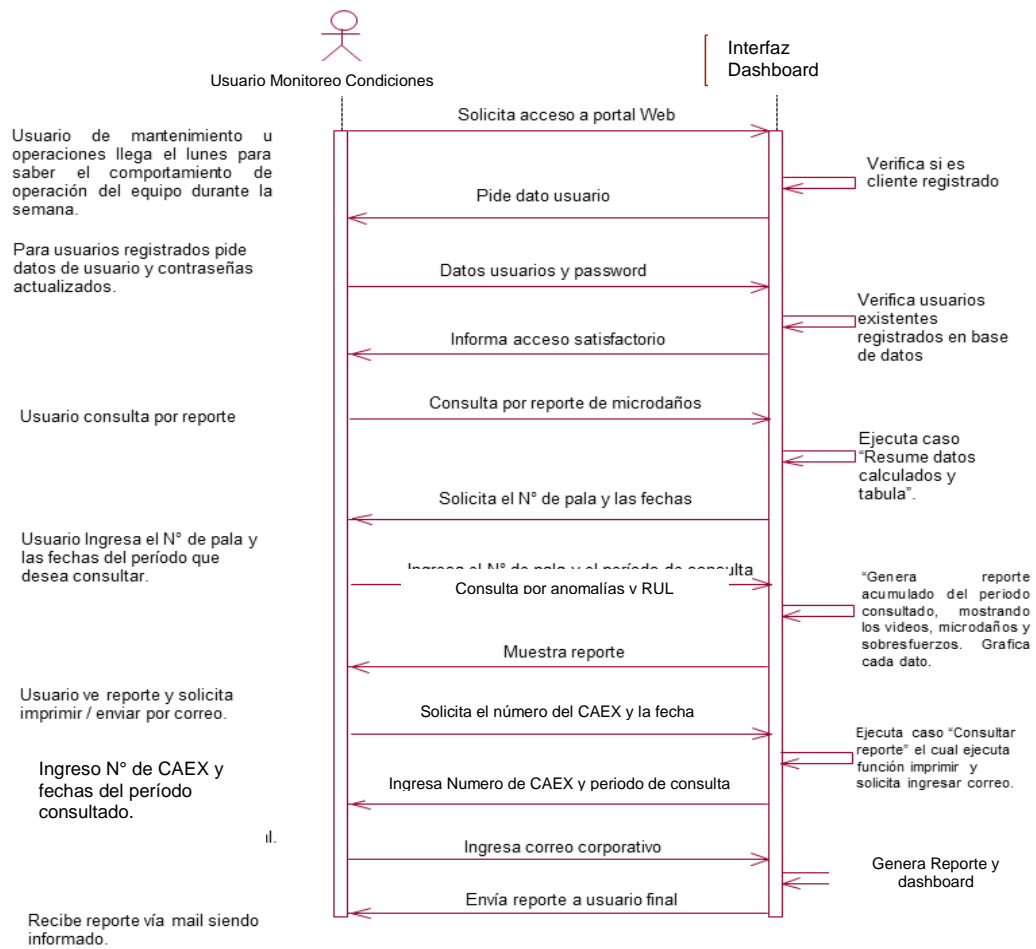
Las posibles métricas para medir la efectividad de la solución serían:

- N° de eventos de anomalías en presión y temperatura
- RUL del motor diésel

Esta solución nos dará la información necesaria para gestionar el activo físico y realizar la inspección oportuna, aplicando la lógica del rediseño de procesos planteado anteriormente.

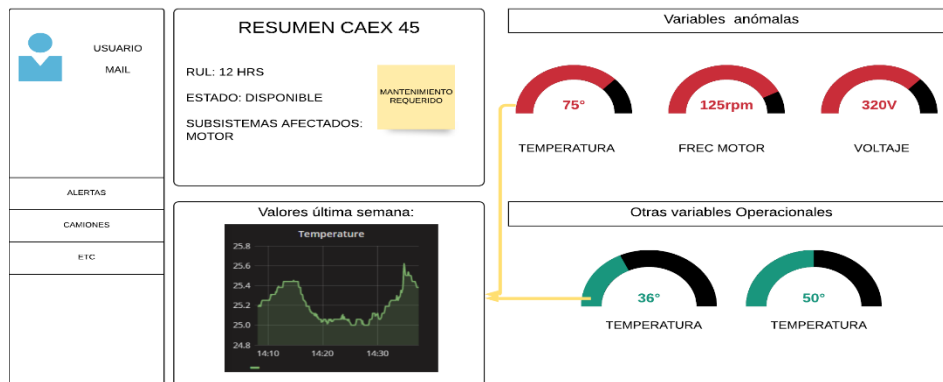
### **Secuencia del sistema**

En el siguiente diagrama se muestra un caso de toma de datos del sistema de monitoreo instalado en el equipo:



(Figura 38: Secuencia del sistema, fuente: propia)

## Propuesta de dashboard



(Figura 39: Propuesta de dashboard, fuente: propia)

## 5.2 Prototipo Funcional Desarrollado

El prototipo funcional desarrollado consto con la data registrada por el sistema SPECTO para los CAEX 50,53,54,55,85,86,97,105 y 107, entre las fechas de abril y julio del año en curso. Para ir en detalle, esta data consistio en 37 variables detectadas por la sensorización del motor y que fueron entregadas con un registro de cada 2 a 5 segundos entre intervalos de medición. Estas variables del motor se muestran a continuación, con su significado:

ReadTime	Tiempo de lectura	X7LB	Temperatura del puerto de escape 7
eqmt	Equipo	X8LB	Temperatura del puerto de escape 8
AMBAIRTEMP	Temperatura del aire ambiente	X1RB	Temperatura del puerto de escape 9
BAROMPRESS	Presión atmosférica	X2RB	Temperatura del puerto de escape 10
BATTVOLT	Voltaje Batería	X3RB	Temperatura del puerto de escape 11
ENGINELOAD	Carga del motor	X4RB	Temperatura del puerto de escape 12
BOOSTPRESSLB	Presión de sobrealimentación 1 (L/B frontal)	X5RB	Temperatura del puerto de escape 13
BOOSTPRESSRB	Presión de sobrealimentación 3 (R/B trasera)	X6RB	Temperatura del puerto de escape 14
BLOWBY	Presión de soplado del cárter	X7RB	Temperatura del puerto de escape 15
COOLANTPRESSURE	Presión del refrigerante del motor	X8RB	Temperatura del puerto de escape 16
COOLANTTEMP	Temperatura del refrigerante del motor	FUELTEMP	Temperatura de combustible
ENGINEOILPRES	Presión de aceite motor	FUELPRESS	Presión de suministro de combustible del motor
ENGINEOILTEMP	Temperatura de aceite motor	INTAKETEMPLBF	Temperatura del colector de admisión 1 (L/B frontal)
ENGINESPEED	Velocidad del motor	INTAKETEMPLBR	Temperatura del colector de admisión 2 (L/B trasero)
X1LB	Temperatura del puerto de escape 1	INTAKETEMPRBF	Temperatura del colector de admisión 3 (R/B frontal)
X2LB	Temperatura del puerto de escape 2	INTAKETEMPRBR	Temperatura del colector de admisión 4 (R/B trasero)
X3LB	Temperatura del puerto de escape 3	FILTERRESTR	Restricción del filtro de aceite lubricante
X4LB	Temperatura del puerto de escape 4	POSTFILT	Presión de aceite posterior al filtro
X5LB	Temperatura del puerto de escape 5	PREFILT	Presión de aceite previa al filtro
X6LB	Temperatura del puerto de escape 6		

*(Figura 40: Variables obtenidas de sistema SPECTO en motor diésel, fuente: propia)*

Adicionalmente, se tuvo que realizar el cruce de datos de falla obtenido en este caso, de nuestra base de datos SAP, la cual aportó de manera significativa las fechas y las fallas imprevistas relacionadas a motores diesel de los camiones de extracción. Estas fallas sirvieron para crear una columna en la BD de SPECTO llamada "Status", en la cual se incluyo un "0" cuando el equipo estaba operativo y un "1" cuando el equipo se encontraba



fuera de servicio por condición de motor.

Denominación	Aviso	Causas ave	Texto causa	Order	Priorid	TextoGrpPartObj	Cau	Txt. cód. mot.
Camion Extracción Komatsu 930E CA92	2332279	0004	codigo 47/1 de motor stall	2750068	1	Motor	0001	FALLA DE COMUNICACIÓN
Camion Extracción Komatsu 930E CA84	2331981	0018	fuga por eliminador acople drenado	2749753	1	Lubricación motor	0001	DETERIORO
Camion Extracción Komatsu 930E CA51	2215969	0002	fuga de aceite lado izquierdo	2638174	1	Motor	0001	BAJO NIVEL DE ACEITE
Camion Extracción Komatsu 930E CA94	2313956	0018	fuga por costado de culata	2732907	1	Motor	0001	DETERIORO
Camion Extracción Komatsu 930E CA96	2309364	0006	codigo 151 alta t° de refrigerante	2728349	1	Motor	0001	MAQUINADO DEFECTUOSO/DAÑADO
Camion Extracción Komatsu 930E CA94	2244341	0002	Se entrega equipo operativo.	2665581	1	Lubricación motor	0001	BAJO NIVEL DE ACEITE
Camion Extracción Komatsu 930E CA104	2313971	0002	bajo nivel de aceite	2732920	1	Lubricación motor	0001	BAJO NIVEL DE ACEITE

(Figura 41: Data de fallas SAP con motivo “Motor diésel”, fuente: propia)

## 5.2.1 Algoritmos utilizados y lenguaje de programación

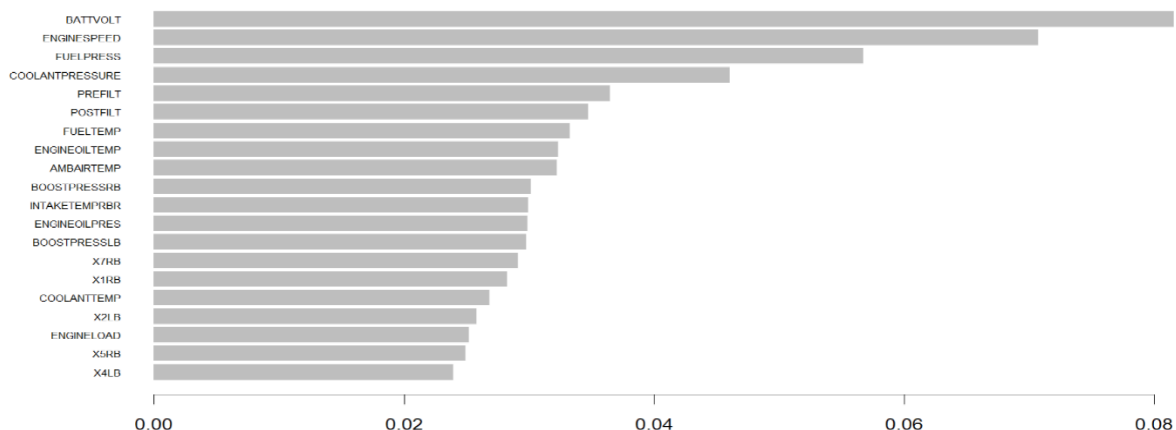
El entorno y lenguaje de programación utilizado fue R, esto debido a que se enfoca al análisis estadístico. Respecto a los algoritmos utilizados, para conocer la probabilidad de fallas en base a la detección de una anomalía, se probaron dos tipos de algoritmos supervisados, en este caso el xgboost y para realizar una comparación de la efectividad del algoritmo de clasificación, se ocupó una regresión lineal.

El xgboost es el algoritmo en base a árboles de decisión más utilizado debido a su gran efectividad al usar datos de gran tamaño de líneas. De hecho, el resultado se robustece y disminuye su porcentaje de error del resultado al momento de iterar en cada línea de la base de datos. Esta BD tiene aproximadamente 500.000 líneas, lo cual genera robustez al momento de utilizar el algoritmo. De hecho al realizar las comparaciones en % de error resultante, se muestra que el factor logloss o rendimiento del clasificador real usado en xgboost fue de 0,00008183, lo que representa un bajo porcentaje de error por pérdida de información. Para que el modelo sea aplicable y poder llamarlo “exitoso” el logloss debe ser siempre menos que 0,5, ya que este varía entre 0 y 1.

Respecto al indicador logloss realizado con regresión lineal, este valor da 0,23, siendo mucho mayor versus el valor resultante con la utilización de xgboost, lo cual indica que al usar un algoritmo clasificador versus de uno regresión da un menor porcentaje de error, teniendo mejor actividad en los resultados entregados.

Al utilizar el algoritmo de clasificación, se priorizan las variables más importantes que

aportan al modelo, pasando de 37 variables a 20, las cuales las que tuvieron mayor incidencia fueron voltaje de batería, Velocidad del motor, presión de combustible, presión de refrigerante, presión de aceite previo y post al filtro y la temperatura del combustible.



(Figura 42: Variables con mayor incidencia para el resultado del modelo, fuente: propia)

AMBAIRTEMP	X1RB	X7RB	ENGINEOILTEMP	BOOSTPRESSLB	COOLANTPRESSURE	BOOSTPRESSRB	status
4	552.94	539.63	96.41	280.50	432	298.50	0
4	550.94	535.31	97.72	288.88	430	294.63	0
5	554.31	535.63	93.59	282.88	422	285.50	0
8	515.63	509.13	83.75	277.13	446	298.88	0
5	522.31	517.44	87.63	272.88	422	272.88	0

(Figura 43: Variables con mayor incidencia y columna estatus para el análisis de supervivencia, fuente: propia)

Respecto a la matriz de confusión resultante, ésta indica el siguiente resultado:

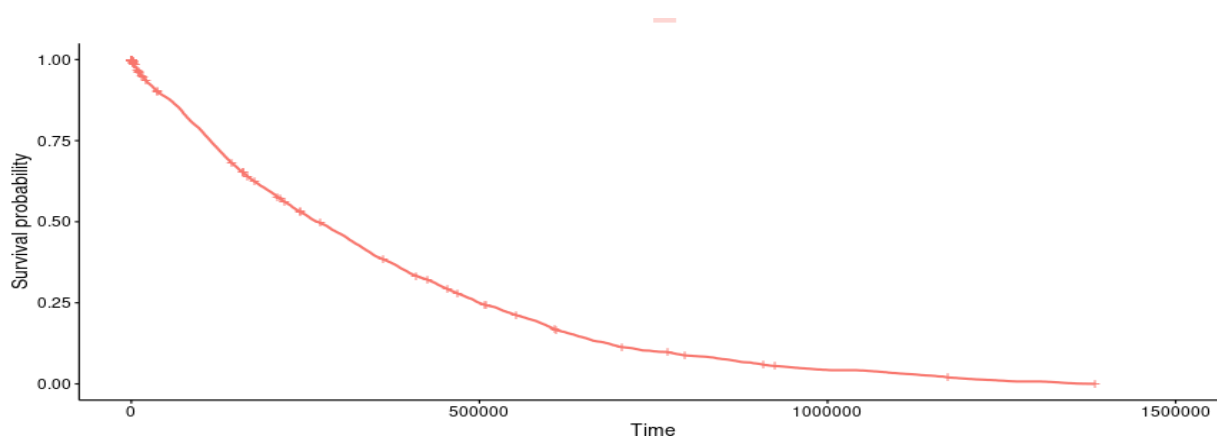
	0	1
0	48807	8
1	6	132

Figura 44: Matriz de confusión xgboost, fuente: propia)

Indicando el porcentaje de asertividad de los resultados en el calculo de las probabilidades de falla son de  $132/148 = 89,2\%$ .

Para el cálculo del RUL, fue necesario ocupar algún algoritmo que se adaptara al análisis de supervivencia requerido para poder predecir a futuro el indicador. En este caso se termina utilizando la regresión de COX o también llamada modelo de los riesgos proporcionales, la cual se utiliza para modelar los riesgos que afectan la supervivencia de una población de datos.

Se utilizan las 17 columnas de datos de mayor incidencia y las probabilidades de falla obtenidas mediante xgboost para poder calcular el RUL y así tomar decisiones con el equipo. Se genera la curva de supervivencia que indica la probabilidad de falla del componente en un periodo de 14 días (1.209.000 segundos en el gráfico).



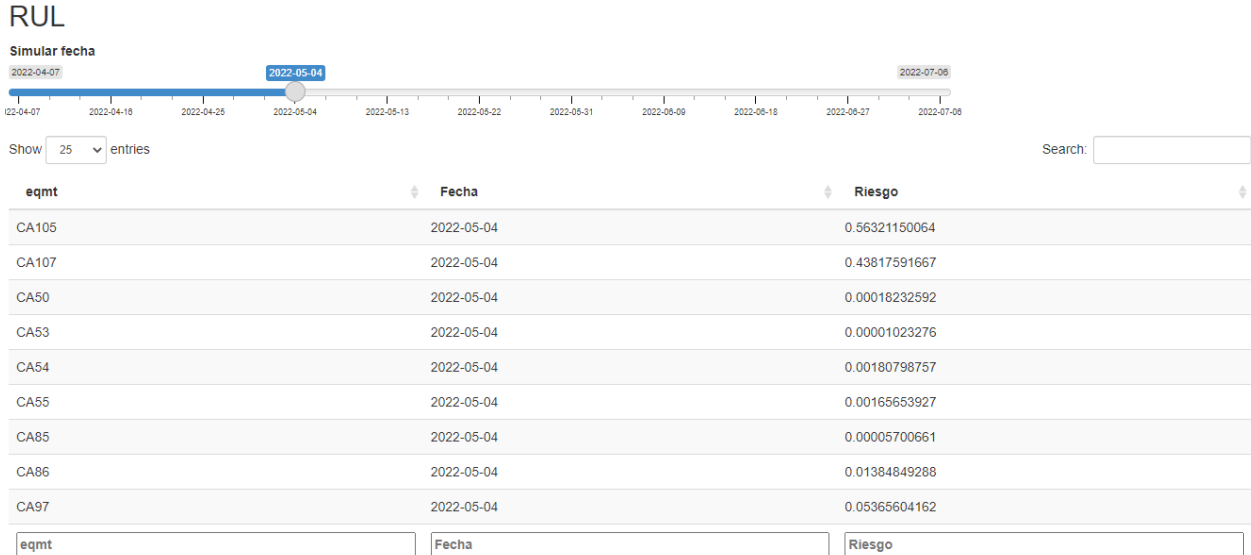
*(Figura 45: Curva de supervivencia obtenida mediante la regresión de COX para obtención del RUL, fuente: propia)*

Respecto al porcentaje de asertividad del indicador RUL, se genera el indicador concordance index (C index) el cual indica que tan bien se ajusta el modelo en la regresión, en este caso fue del 0.71, lo que indica que es un buen modelo y se adapta bien a la data registrada.

### **5.3 Visualización de los resultados**

Para la visualización de los datos, se crea un dashboard, el cual reúne todas las técnicas utilizadas para poder tomar una decisión con el equipo por parte del supervisor o el

técnico de monitoreo de condiciones. La visualización resultante se muestra a continuación: en este ejemplo se muestra el CAEX que presento la mayor probabilidad de falla en la fecha de evaluación que fue el 04-05-2022, el cual fue el CAEX 105.



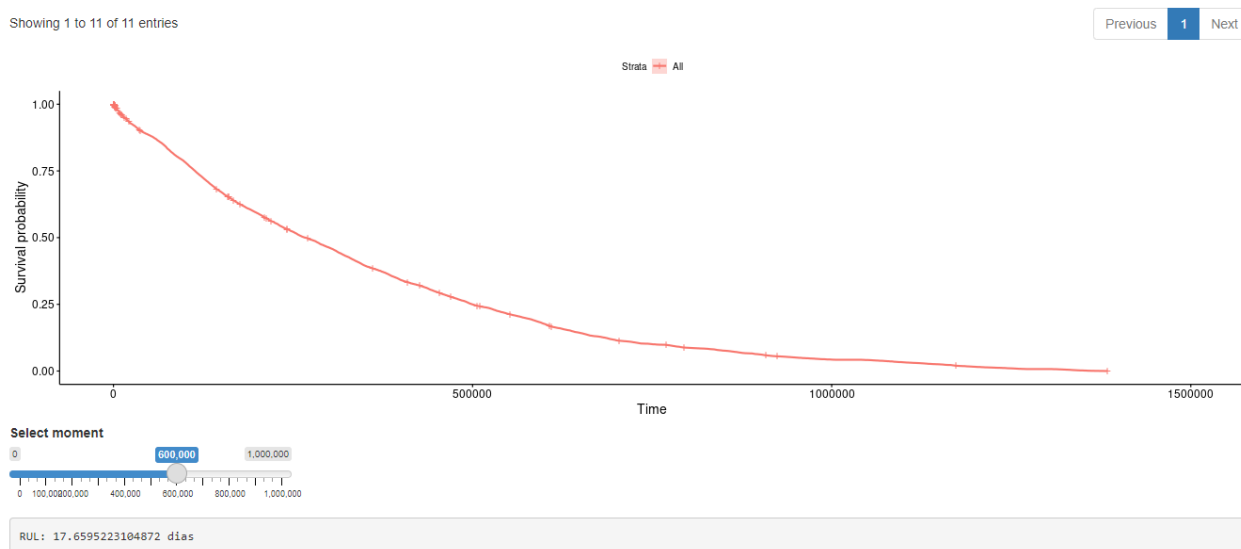
(Figura 46: Dashboard creado y probado en el periodo de data indicado, fuente: propia)

En la figura 46 se muestra el dashboard ya implementado en el area de mantenimiento mina, el cual se muestra el top de los caex con la mayor probabilidad de falla, siendo el CAEX 105 con un 56% de probabilidad de falla en su motor diesel.

uno	min	mean	max	actual
BATTVOLT	20	27	29	27.90
ENGINESPEED	20	1748	1999	1937.38
INTAKETEMPRBR	-40	56	210	64.00
FUELPRESS	32	614	912	712.00
AMBAIRTEMP	-2732	-323	467	310.00
X1RB	-32	471	934	704.63
X7RB	8	518	628	580.75
ENGINEOILTEMP	16	93	106	104.28
BOOSTPRESSLB	82	279	330	301.13
COOLANTPRESSURE	16	369	456	450.00
BOOSTPRESSRB	84	279	343	309.25

(Figura 47: Dashboard creado y probado en el periodo de data indicado, fuente: propia)

En la figura 47 se muestran las variables principales que estarían afectando esa probabilidad de falla, siendo en este caso para el CAEX 105 en orden de relevancia: el voltaje de batería, velocidad del motor, temperatura del colector de admisión, presión de combustible y la temperatura ambiente. Cabe destacar que estas variables mencionadas son factores contribuyentes a la falla que hasta el día de hoy no habían sido consideradas y que aportan información valiosa a los técnicos de monitoreo para realizar los análisis de detección temprana de fallas catastróficas, a parte del ya utilizado análisis de aceite o tribológico.



(Figura 48: Dashboard creado y probado en el periodo de data indicado, fuente: propia)

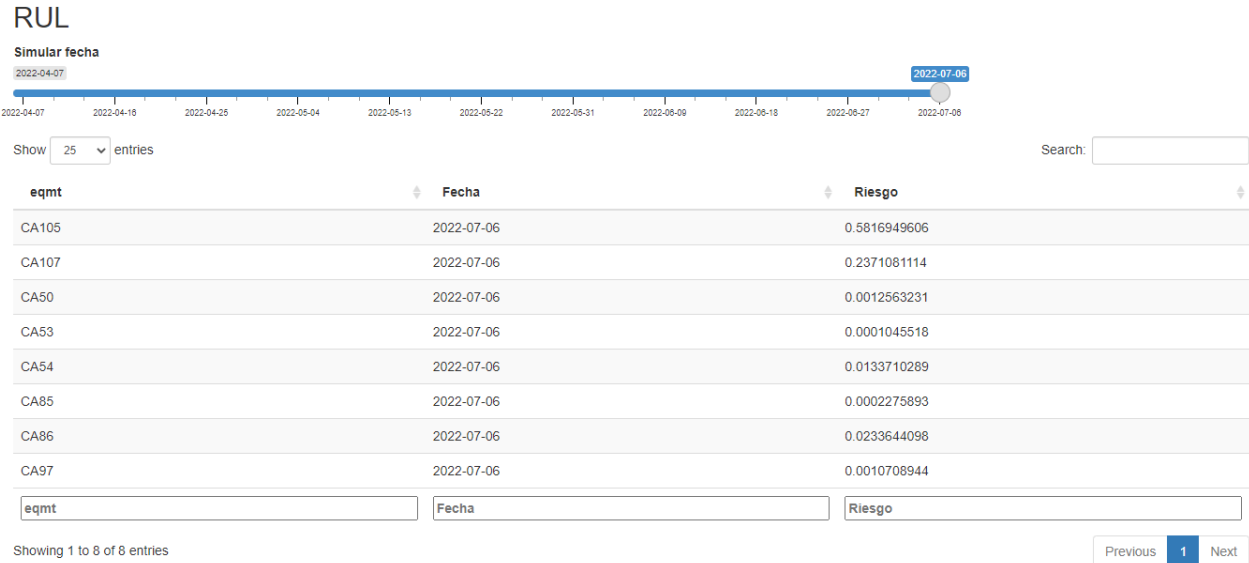
En la figura 48 se muestra el apartado del indicador RUL, que muestra cuantos días, según el modelo de regresión COX, le quedarían al motor ante una falla inminente. Se hace el ejercicio para 600.000 segundos o para 7 días, mostrando que la vida estimada restante del componente o por sus siglas en ingles RUL, es de 17 días.

Esta información es de suma importancia, ya que al tener un RUL por sobre 7 días, permite generar a la gente de planificación los planes necesarios para programar una detención para el próximo plan en curso y no detener el equipo de manera imprevista para realizar algún chequeo, sacando el equipo de operación. Cabe mencionar que, si el RUL del equipo hubiese sido menor o igual a 7 días, el CAEX 105 según el modelo de

integración a la estrategia de mantenimiento de la figura 37, se debió haber solicitado a taller dentro de la semana en curso del supervisor de mantenimiento para evaluar y realizar testeo con ECM del motor diésel.

**Análisis del dashboard con otra fecha**

Se realiza un nuevo análisis con la data registrada el 06-07-22, el cual muestra que el CAEX 105 sigue siendo el mayor riesgoso a tener una falla de motor diésel.



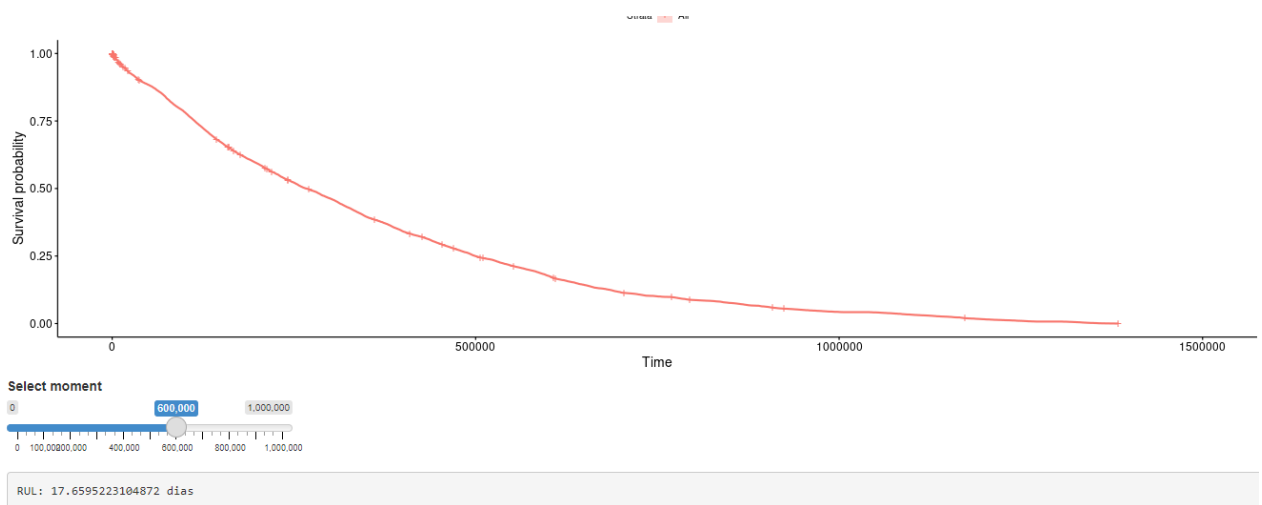
(Figura 49: Dashboard creado y probado en el periodo de data indicado, fuente: propia)

Se muestra que el CAEX 105 tiene un 58% de probabilidad de falla, siendo afectado por las mismas variables contribuyentes del periodo de mayo 2022: voltaje de batería, velocidad del motor, temperatura del colector de admisión, presión de combustible y la temperatura ambiente. Cabe mencionar que la probabilidad de falla aumentó un 2 %, siendo el factor contribuyente de más aumento la presión de combustible, la cual aumentó en 146 PSI, lo cual podría indicar alguna obstrucción al sistema de inyección de combustible por filtros u otro. Lo bueno de este análisis es que permite verificar nuevas variables que aportan al diagnóstico anticipado de una falla catastrófica.

uno	min	mean	max	actual
BATTVOLT	20	27	29	28.00
ENGINESPEED	20	1748	1999	1947.13
INTAKETEMPRBR	-40	56	210	62.00
FUELPRESS	32	614	912	852.00
AMBAIRTEMP	-2732	-323	467	25.00
X1RB	-32	471	934	590.25
X7RB	8	518	628	576.81
ENGINEOILTEMP	16	93	106	102.00
BOOSTPRESSLB	82	279	330	324.00
COOLANTPRESSURE	16	369	456	452.00
BOOSTPRESSRB	84	279	343	315.25

uno min mean max actual

(Figura 50: Dashboard creado y probado en el periodo de data indicado, fuente: propia)



(Figura 51: Dashboard creado y probado en el periodo de data indicado, fuente: propia)

Respecto al RUL, este se mantuvo en 17 días, lo cual permite generar una inspección programada y considerada en el plan para la semana próxima de la medición realizada.

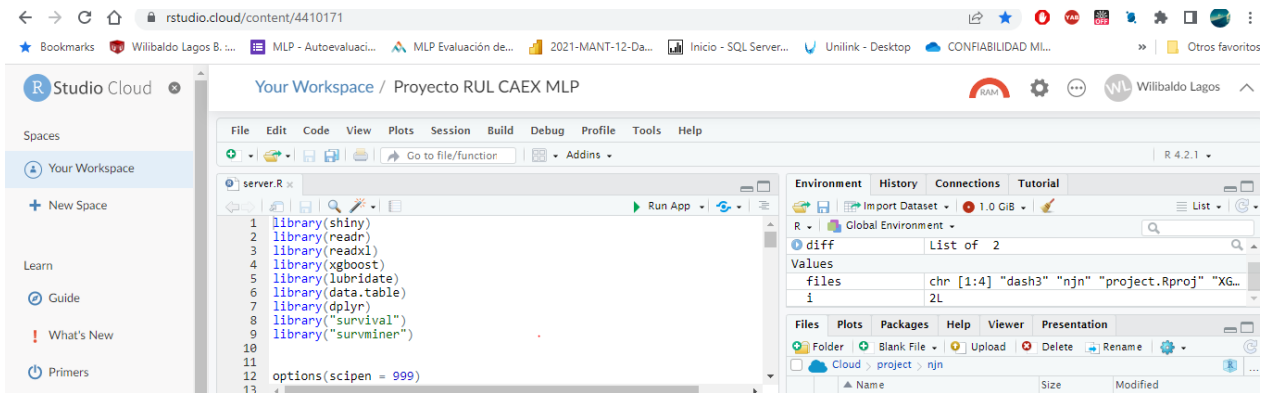
## **CAPITULO 6: PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN**

### **6.1 Descripción General**

La prueba de este proyecto fue realizada en período de finales de agosto 2022, cuando estuvo ya terminado el prototipo y el dashboard para ser utilizado con la data obtenida de forma manual desde SPECTO. La data que se pudo obtener fue dentro de un periodo de 3 meses, debido a la cantidad de datos y el peso de estos archivos. Se tomaron como muestra los 9 camiones de extracción con menor confiabilidad de los 54 disponibles en la mina, los cuales fueron los CAEX 50,53,54,55,85,86,97,105 y 107, lo que representa una muestra del 17% del total de la flota. Por el lado de la data obtenida, ésta fue sacada desde el 07-04-22 al 06-07-22, la cual representa 3 meses de operación de cada equipo. Como se explicó en el capítulo previo, la data presento 37 variables detectadas por la sensorización del motor y que fueron entregadas con un registro de cada 2 a 5 segundos entre intervalos de medición. Adicionalmente se utiliza la falla de imprevistos de motor diésel obtenida del ERP de mantenimiento mina SAP, modulo PM, el cual aportó en generar los status fuera de servicio por motor diésel necesarios para crear las probabilidades de falla con xgboost (clasificación) y la vida remanente del componente o RUL por sus siglas en inglés (remaining useful life).

Para la utilización del dashboard implementado, se utiliza el PC del monitoreo de condiciones mediante la aplicación web rstudio, que opera como programa de programación con lenguaje R en la nube. Basta solo con realizar log in mediante una cuenta de google para poder utilizar el dashboard y ser compartido por las personas que utilicen el sistema.





(Figura 52: programa en la nube con entorno de programación R, fuente: rstudio.cloud)

Basta con solo presionar el botón “Run app” para utilizar el dashboard creado para el área de monitoreo de condiciones.

## 6.2 Procesos soportados

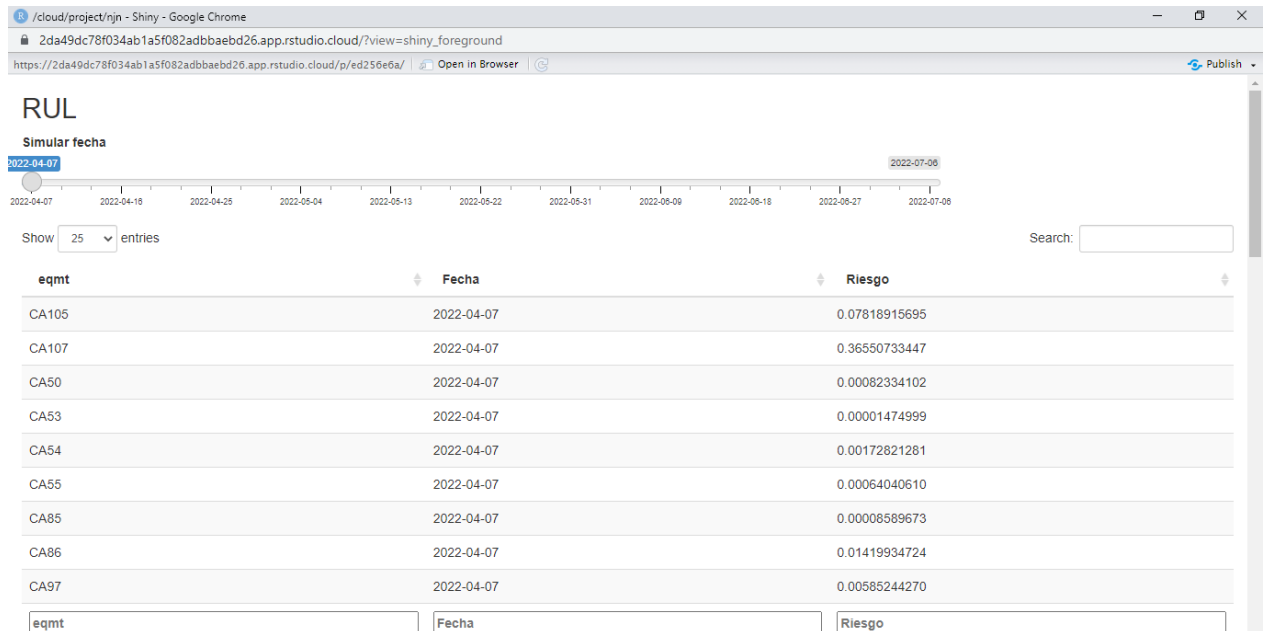
El proceso más relevante soportado es el área de monitoreo de condiciones. Con esta herramienta tecnológica el analista de motores podrá manejar otras variables de análisis para evitar un accidente catastrófico. Estas variables como voltaje de batería, velocidad del motor y presión de combustible, por mencionar algunas, vienen a ayudar al analista a interpretar los motivos de una posible falla inminente. Cabe mencionar que este apoyo tecnológico es paralelo a los ya utilizados análisis de aceite motor realizados en MLP.

uno	min	mean	max	actual
BATTVOLT	20	27	29	28.00
ENGINESPEED	20	1748	1999	1947.13
INTAKETEMPRBR	-40	56	210	62.00
FUELPRESS	32	614	912	852.00
AMBAIRTEMP	-2732	-323	467	25.00
X1RB	-32	471	934	590.25
X7RB	8	518	628	576.81
ENGINEOILTEMP	16	93	106	102.00
BOOSTPRESSLB	82	279	330	324.00
COOLANTPRESSURE	16	369	456	452.00
BOOSTPRESSRB	84	279	343	315.25

(Figura 53: Variables adicionales consideradas, fuente: propia)

### 6.3 Pantallas del dashboard

Ingreso al dashboard mediante ejecutar el código creado en entorno R en la nube:



(Figura 54: Probabilidad de falla con xgboost, fuente: propia)

Se muestra la primera parte del dashboard que muestra como primera instancia la selección de fechas, para esta demo se analiza data en un periodo pasado. Pero una vez generado el entorno SQL como base de datos, se podrá analizar data entrante en tiempo real actualizada de forma online conectando la base de datos al SPECTO de cada equipo. Posterior a eso se muestran por orden de riesgo, desde el más alto al más bajo, los CAEX que tienen la mayor probabilidad de falla del motor diésel. En la parte inferior se agregan buscadores por columna que serán necesarios cuando se cuente con el total de camiones analizados (54 unidades).

La segunda área del dashboard muestra las variables sensorizadas de mayor contribución, según el modelo de clasificación xgboost y que aportan a la probabilidad de riesgo de una falla catastrófica de motor diésel. Por otro lado, se crean indicadores de valores mínimos, de promedio y máximo de la flota de CAEX para poder compararlos con

el valor actual que presenta en dicho periodo.

Camion

CA105

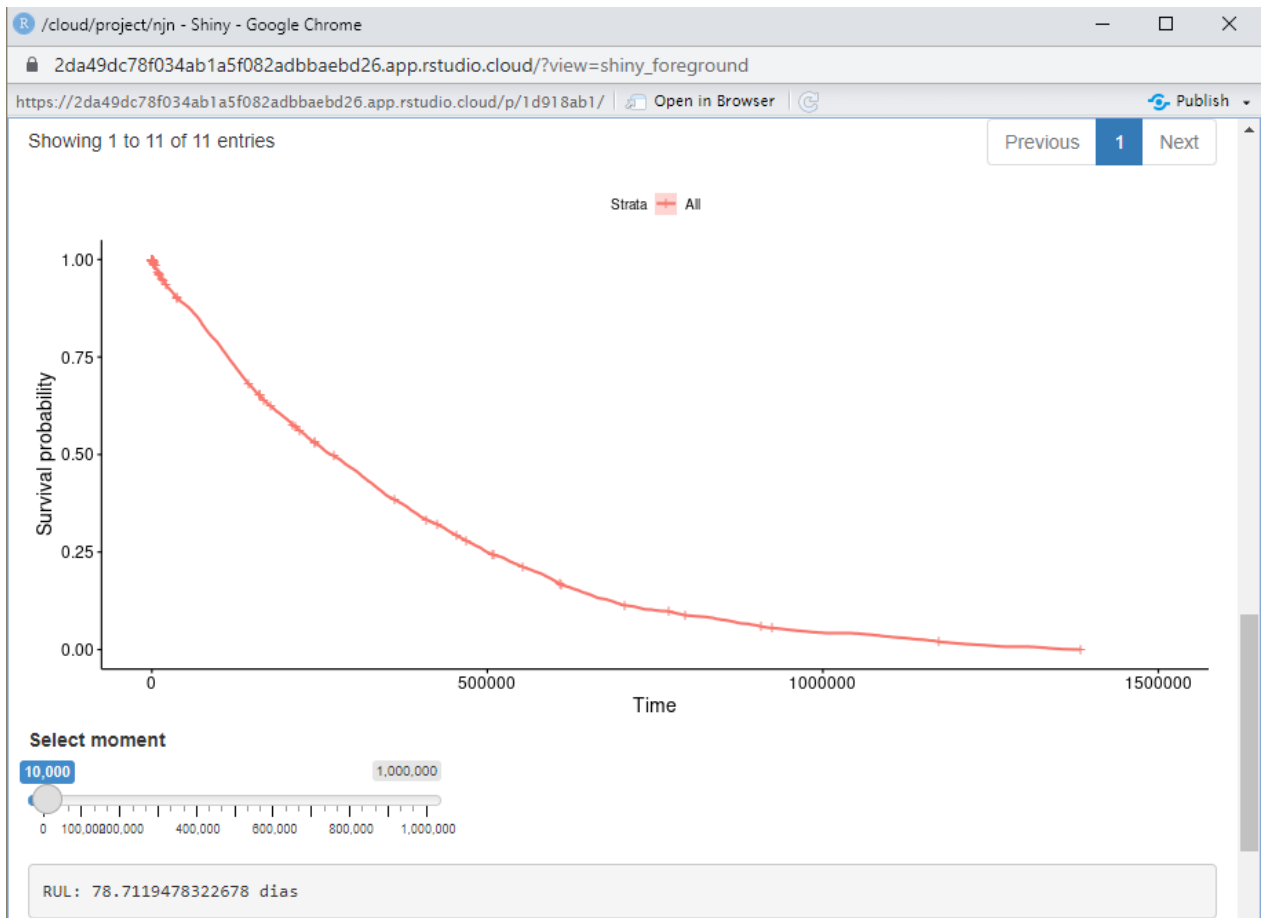
Show 25 entries Search:

uno	min	mean	max	actual
BATTVOLT	20	27	29	27.20
ENGINESPEED	20	1748	1999	1937.13
INTAKETEMPRBR	-40	56	210	53.00
FUELPRESS	32	614	912	744.00
AMBAIRTEMP	-2732	-323	467	15.00
X1RB	-32	471	934	542.56
X7RB	8	518	628	540.31
ENGINEOILTEMP	16	93	106	93.25
BOOSTPRESSLB	82	279	330	291.75
COOLANTPRESSURE	16	369	456	448.00
BOOSTPRESSRB	84	279	343	309.88

uno min mean max actual

(Figura 55: Factores contribuyentes entregados por xgboost, fuente: propia)

Finalmente se muestra el indicador RUL a través de la curva de supervivencia creada con la regresión COX, que muestra el tiempo restante que le queda al motor diésel ante un imprevisto o falla. Se crea un selector de tiempo para indicar el RUL en un periodo mayor o menor a 7 días.



(Figura 56: Curva de supervivencia y evaluación del RUL, fuente: propia)

## 6.4 Resultados de la implementación

Las pruebas realizadas en el periodo de la última semana de agosto 2022 muestran que el dashboard es un complemento estadístico y no reemplaza la experiencia de los técnicos de monitoreo de condiciones ni tampoco de los mecánicos de motores diésel. Ya que la herramienta tecnológica entrega información estadística valiosa que antes no se tenía en la retina de los técnicos, como lo son variables de temperatura, presión, voltaje batería, entre otros factores contribuyentes detectados por el algoritmo xgboost, pero que deben ser validados técnicamente a través de inspecciones por parte de los mecánicos en taller. Por otro lado, se logra detectar que de los 9 CAEX detectados, son solo 2 los que tienen la mayor probabilidad de falla de motor diésel, que son el CAEX 105 y el 107. Esta información logro aportar en la priorización de cuál camión debe entrar antes a su mantenimiento versus los demás, siendo estos dos los que entran en el top de bajar a

taller a inspección versus los demás de la muestra dentro del programa semanal. Esta decisión a nivel de la planificación del mantenimiento busca generar la confiabilidad necesaria para evitar una falla catastrófica. Por otro lado, en base a la información entregada del dashboard, se decide conectar al motor Cummins del CAEX 105, el sistema de medición de variables de motor llamado SPECTO el día 3 de septiembre para poder analizar las variables relacionadas con el aumento de presión de combustible detectados en el dashboard, logrando detectar una saturación acelerada de partículas de polvo en el filtro de combustible. Esta saturación se genera antes de las 500 horas de operación del filtro, lo cual solo pasa en este modelo de motores Cummins, qsk60, los cuales tienen los CAEX 105 y 107. Este descubrimiento todavía está en análisis por parte del área de confiabilidad, pero logra abrir un nuevo modo de falla no detectado antes por el área de monitoreo de condiciones ya que solo analizaban resultados de análisis de aceite

uno	min	mean	max	actual
BATTVOLT	20	27	29	28.00
ENGINESPEED	20	1748	1999	1947.13
INTAKETEMPRBR	-40	56	210	62.00
FUELPRESS	32	614	912	852.00
AMBAIRTEMP	-2732	-323	467	25.00
X1RB	-32	471	934	590.25
X7RB	8	518	628	576.81
ENGINEOILTEMP	16	93	106	102.00
BOOSTPRESSLB	82	279	330	324.00
COOLANTPRESSURE	16	369	456	452.00
BOOSTPRESSRB	84	279	343	315.25

uno    min    mean    max    actual

(Figura 57: aumento en 126 PSI en la presión de combustible, fuente: propia)

## 6.5 Usabilidad del dashboard

Para saber si el dashboard podría ser utilizado por los técnicos, se les realiza una ronda de consultas referente a la dificultad de su uso y como se verían al usar el programa dentro de sus labores rutinarias de análisis de aceite. Estos indican que debe ser validado y solicitado por su jefatura directa, que vendría a ser el ingeniero senior de monitoreo de condiciones y actual administrador del contrato de los servicios. Se genera una reunión para la semana del 12-09 para validar la usabilidad con dicha persona. Respecto a la

dificultad, la encuentran de fácil uso producto de que solo deben seleccionar la fecha y el CAEX. Respecto a quien toma la decisión de tomar acciones de priorización con el uso del software, es el técnico de monitoreo el responsable de ello, esto ya que la labor actual del rol es la priorización y generación de órdenes de trabajo para ejecutar acciones de mantenimiento en los camiones de extracción. Con el uso del programa, los técnicos aparte de generar su labor actual de análisis y priorización, podrán ser apoyados a priorizar que numero de camión debe ingresar antes, esto por medio de los resultados que entrega el programa, como el RUL, indicadores de presión, temperatura del componente y probabilidad de falla. Se cree que esta mejoría en la priorización de actividades que luego serán planificadas para su ejecución, evitará las fallas de larga duración en los motores diésel.

## **6.6 Gestión del cambio**

Esta parte fundamental de la implementación, la gestión del cambio tiene el objetivo de tener una metodología clara que apoye el proceso del uso del dashboard. En este caso se utiliza la propuesta enseñada por Olguín (2004).

### **6.6.1 Sentido de urgencia**

El sentido de urgencia en la implementación se podría indicar que es de alta urgencia, esto producto de los altos niveles de imprevisto que tienen los motores diésel de la flota de CAEX. Por lo cual es necesario esta propuesta de mejora para realzar el valor que requiere tanto el área de monitoreo de condiciones, planificación y ejecución, dando soporte a tomar mejores decisiones con los activos de la compañía.

### **6.6.2 Cambios y Conservación**

Lo que se requiere conservar es la misma calidad de los técnicos de monitoreo en los análisis de aceite. Se mantendrá la misma dotación de 3 técnicos por turno, 7x7.

Mantener el mismo proceso actual de monitoreo y no perder la calidad técnica actual. Por otro lado, no se tiene la intención de aumentar las horas ni carga de trabajo producto del uso del dashboard, más bien usarlo como complemento a sus tareas de análisis. También se requiere mantener la motivación de cada técnico de monitoreo, y no generar conflictos internos dentro del área producto de la implementación de esta nueva tecnología.

Respecto a los cambios, estos serán el tener en sus computadores u dashboard que funcione como aporte a los análisis de monitoreo de condiciones. También deben cambiar el proceso de reportabilidad, ya que, si existe algún RUL menor a 7, deberán emitir el reporte a la supervisión del área ejecutora, y si es mayor 7 días, se enviará reporte con lo detectado al área de planificación para realizar una inspección programada dentro del plan de la próxima semana si es que lo amerita. Por otro lado, se requerirá priorizar los CAEX entregados por el dashboard en las reuniones de planificación.

### 6.6.3 Gestión del Poder

Tabla 15: Mapa de gestión de poder.

Actor	Rol Actor	Tipo de poder	Nivel de poder
Rodrigo Canales	Superintendente confiabilidad y mejoramiento	Legítimo Referente	Muy alto
Fernando Antonio	Ingeniero Senior Monitoreo de Condiciones	Legítimo Referente	Muy alto
Equipo técnicos monitoreo de condiciones	Técnico monitoreo condiciones	Legítimo experto	Medio
Luis Larrañaga	Ing. senior planificación	Legítimo experto	Alto
Rodrigo Rojas Rivera	Supervisor de mantenimiento	Legítimo experto	medio

Técnicos mecánicos motores diésel	Técnicos motor diésel	Legítimo experto	medio
--------------------------------------	--------------------------	---------------------	-------

Se muestran en la tabla todos los roles principales que deben estar presentes a la hora de implementar este proyecto. Como primera instancia se tiene al superintendente de confiabilidad y mejoramiento, el cual es el dueño del proyecto y el principal sponsor. Es él quien autoriza a que el proyecto se desarrolle e implemente, además de difundir comunicacionalmente al equipo los pasos a seguir y quién liderará la implementación. En segundo lugar, se encuentra el ingeniero senior de monitoreo de condiciones, quién es el rol que lidera la implementación, generando el plan, carta Gantt e hitos relevantes para su seguimiento. También tiene el rol fundamental de una vez implementado el proyecto difundirlo a las demás áreas de la gerencia y controlar que se estén realizando las actividades solicitadas al nuevo rol. El equipo de técnicos de monitoreo de condiciones tiene el rol de ejecutar el proyecto, mediante la descarga de la data y cargar el programa para obtener los datos necesarios (RUL, priorización de PM de CAEX). El ingeniero senior de planificación es el responsable de planificar la priorización entregada por los técnicos de MONCON (recursos, repuestos, equipos de apoyo). El rol del supervisor de mantenimiento es el responsable de velar por el cumplimiento del plan semanal de las actividades planificadas. Finalmente, los técnicos de motores diésel son los responsables de ejecutar el trabajo planificado en el programa semanal.

### **6.6.3.1 Del discurso técnico a la innovación**

Para convencer al sponsor del proyecto se tiene que mostrar cuál será la relación costo beneficio que tendrá el área de mantenimiento mina una vez implementado este proyecto. En una primera instancia se debe mostrar que esta propuesta está alineada con el pilar de la innovación de la empresa, esto ya que la implementación de herramientas tecnológicas con el uso de machine learning en el mantenimiento de equipos minero es considerado, tanto en minera los pelambres como la industria, como algo nuevo, nunca antes visto y se cree que tiene la capacidad de aportar en la toma de decisiones que realiza el equipo y mejorar los indicadores de disponibilidad. Por otra parte, el uso de machine learning en los procesos de mantenimiento de otras industrias, como la aviación, crea la idea de que el proyecto puede



ser beneficioso para nuestra área de mantenimiento de camiones de extracción. A lo dicho anteriormente, hay que agregarle el bajo costo que significa crear este software, además de que existe la posibilidad de poder mejorarlo en el futuro, con la ayuda del área de analítica de datos de minera los pelambres.

Por lo comentado anteriormente, esta propuesta da indicios de que tendrá un alto potencial de ser implementada y ser considerada como idea innovadora dentro de la empresa. Por otro lado, se le suma que el proyecto tendrá bajo margen de pérdida monetaria y sin afectación a los actuales indicadores de resultado en caso de que el proyecto falle, por lo que su variabilidad se ve reducida para la gerencia.

#### 6.6.4 Coalición conductora

El grupo de personas que se indica a continuación es la que permite que los cambios ocurran dentro del área, esto debido principalmente por sus cargos, funciones y liderazgo dentro del área:

*Tabla 16: Coalición conductora.*

¿Quién?	¿Por qué?
Rodrigo Canales	Es el dueño del proyecto y el principal sponsor. Es él quien autoriza a que el proyecto se desarrolle e implemente, además de difundir comunicacionalmente al equipo los pasos a seguir y quién liderará la implementación. Además autoriza el agregar nuevas funciones al rol de los técnicos de monitoreo de condiciones.
Fernando Antonio	Es quién lidera la implementación, generando el plan, carta Gantt e hitos relevantes para su seguimiento. También tiene el rol fundamental de una vez implementado el proyecto difundirlo a las demás áreas de la gerencia y controlar que se estén realizando las actividades solicitadas al nuevo rol. Además gestiona los cursos de ser necesarios para los técnicos de monitoreo de condiciones.
Equipo técnicos monitoreo de condiciones	Son los responsables de usar el programa, analizar los datos y priorizar actividades a planificación, sin ellos, el proyecto no podría ejecutarse.

### 6.6.5 Narrativas y Ofertas

Las narrativas y ofertas que se muestren a continuación permitirán manejar de mejor manera las expectativas que se generen dentro del proyecto. se utilizará la matriz IQP – DPDe que significan: “I” de intereses, “Q” por los quiebres, “P” de preocupaciones, “D” de discurso, “P” son las prácticas y “De” que relata los demonios.

Tabla 17: Narrativas y ofertas.

¿Quién?	IQP - DPDe	Oferta
Rodrigo Canales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• I: Ser de la superintendencia un referente en innovación dentro de la gerencia y demostrar que nuestros proyectos mejoran los indicadores de la flota.</li> <li>• Q: Fallas catastróficas de motores diésel.</li> <li>• P: Cumplimiento de los indicadores de disponibilidad de los equipos mina.</li> <li>• D: “Somos el área responsable de mejorar los indicadores de la gerencia mina”.</li> <li>• P: Da directrices de forma constante.</li> <li>• De: Fallas catastróficas sin previo aviso ni alertas.</li> </ul>	<p>“El proyecto , alineada con la estrategia de innovación de la empresa, apoyara a los técnicos de monitoreo de mejorar la priorización de actividades de mantenimiento en los camiones de extracción de la mina, resultando en una mejor toma de decisiones en las intervenciones, logrando bajar la tasa de fallas catastróficas de los motores diésel de los equipos”.</p>
Fernando Antonio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• I: Mejorar mi proceso interno de monitoreo de condiciones y sacar el máximo potencial al equipo.</li> <li>• Q: Falta de compromiso del equipo.</li> <li>• P: Que no se pueda predecir una falla catastrófica.</li> </ul>	<p>“El proyecto nos permitirá mejorar nuestro proceso interno, mejorando la priorización de cada equipo, permitiendo planificar una intervención programada antes de una falla</p>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• D: “Debemos anticiparnos a la falla”</li> <li>• P: Aportar ideas innovadoras.</li> <li>• De: Falta de compromiso del equipo.</li> </ul>	catastrófica”.
Equipo técnicos monitoreo de condiciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• I: Que el proyecto aporte a nuestra labor actual.</li> <li>• Q: Generar mayor carga laboral.</li> <li>• P: De generar un buen reporte de monitoreo de condiciones y una buena priorización a planificación.</li> <li>• D: “Que sea fácil de usar y no retrase nuestras labores diarias”</li> <li>• P: Conocer de los equipos, analizar los aceites de motores, solicitar trabajos de inspección y reparación programada al planificador.</li> <li>• De: Mayor carga laboral diaria.</li> </ul>	“El programa al cargar el archivo de datos semanal, nos entrega información valiosa para nuestra labor. Indicadores como el RUL, data de monitoreo del motor diésel, y la probabilidad de falla nos ayudarán a definir qué camión debe ser inspeccionado o planificado antes, mejorando nuestra priorización que le entregamos al planificador”.

### 6.6.5 Comunicación

La comunicación es la principal estrategia para hacer participar al equipo en la implementación del proyecto y generar los cambios necesarios. Las instancias de comunicación se realizan en las reuniones de inicio de turno de la gerencia mantención mina, en las reuniones semanales de la superintendencia de confiabilidad y en reuniones exclusivas para el proyecto en cuestión.

En esta última se realizan los acuerdos y se comunica el diseño de la aplicación, recibiendo opiniones positivas respecto al programa. Por otra parte, se invita a los mandos operativos, tanto los supervisores como los técnicos de monitoreo de condiciones, con el fin de hacerlos participes desde el inicio del proyecto y así, aumentar su compromiso e interés. Todos los compromisos que se generan quedan en minuta y se les realiza seguimiento de forma semanal.

### **6.6.6 Evaluación y cierre**

Respecto al cierre del proyecto, se realizó una presentación con la demostración el proyecto al gerente mantención mina, superintendente confiabilidad en donde se demostraron los alcances que tiene el proyecto (descritos en esta tesis). Por otro lado, se instaló el programa en un computador tipo desktop que es utilizado por los técnicos de monitoreo y en el cual pudo ser utilizado por ellos.

Se recibió por otro lado la retroalimentación del gerente mantenimiento, el cual indica que esperara obtener resultados del programa para evaluar la posibilidad de replicar en otros procesos dentro de la gerencia.

## **CAPITULO 7: EVALUACION ECONÓMICA**

### **7.1 Inversión**

La inversión de este proyecto cuenta con 2 tipos, una para compra de activos fijos y por otra parte el apoyo de un FreeLancer por 2 meses para la creación del programa y para la capacitación de los técnicos de ambos turnos con una duración de 2 horas por cada uno estando en faena.

Respecto a la compra de los activos físicos, estos fueron 2 computadores, tipo notebook donde se instalaron los programas R- Studio para hacer correr los programas realizados. Respecto a los sueldos de los técnicos y la obtención de la data, estos no consideran costo alguno adicional los cuales se mantienen pagados por la misma empresa.

A continuación de muestra el detalle de cada uno de los ítems de la inversión inicial:

*Tabla 18; Inversión.*

Cantidad	Unidad de medición	Ítem de inversión	Valor unitario	Factor de ajuste	Valor ajustado	Tipo de moneda	Valor total
2	Unidad	PC portátil Dell latitude	\$ 450.000	1,0	\$450.000	Pesos Chilenos	\$ 900.000
2	Mes	Freelancer portal Upwork	\$400.000	1,0	\$400.000	Pesos Chilenos	\$800.000

## 7.2 Beneficios

El objetivo de este proyecto es aumentar la disponibilidad de los camiones de extracción mediante la disminución de las fallas catastróficas en motores diésel de los camiones de extracción de minera los pelambres, en ese sentido se prevé que al utilizar la herramienta tecnológica se pueda disminuir en por lo menos una falla catastrófica de motor diésel al año, lo que considera un potencial ahorro de \$USD 1.200.000 dólares al año.

*Tabla 19: Beneficio del proyecto.*

Cant.	Unidad de medición	Ítem de inversión	Valor unitario	Factor de ajuste	Valor ajustado	Tipo de moneda	Valor total
1	Unidad	Motor Diésel QSK 60	\$ 1.200.000	1,0	\$ 1.200.000	US Dólar	\$ 1.200.000

## 7.3 Costos

No se consideran costos adicionales al proyecto, debido a que el uso del software no considera mantenimiento, tampoco uso adicional de insumos o herramientas.

## **CAPITULO 8: CONCLUSIONES**

Minera Los Pelambres se encuentra inserto en un mercado productor de cobre competitivo. Es por esto por lo que la empresa constantemente tiene que velar por aumentar su productividad, reducir sus costos y mejorar sus procesos internos para cumplir con los compromisos económicos pactados con sus clientes. La problemática abordada en este proyecto obedece a satisfacer la necesidad de mejorar la productividad de la empresa disminuyendo las pérdidas de producción o de movimiento de tierra que ocurren producto de la indisponibilidad de los equipos de transporte.

La problemática abordada con la propuesta de solución impacta pilares estratégicos de la compañía como lo son la competitividad y la innovación. Por lo cual el diseño de la solución está alineado con los objetivos estratégicos de minera los Pelambres.

La metodología de trabajo se basa en la propuesta por el área de ingeniería de negocios del MBE, el cual fija pasos para que, en función de la estrategia empresarial, se pueda detectar el problema y buscar una solución de índole tecnológica. Por otro lado, también se utiliza la metodología de Oscar Barros, que propone una serie de patrones de negocios que sirvieron como marcos de referencia para ubicar el proceso de mantenimiento dentro del negocio y como este afecta su cadena de valor.

En este trabajo la evaluación del problema nace del pilar estratégico competitividad con el objetivo de mejorar la disponibilidad física de 1 de los activos físicos de la mina, el cual son los camiones de extracción o CAEX. La pérdida de disponibilidad también afecta el objetivo estratégico de excelencia operacional, esto debido al tiempo necesario para tener el equipo disponible, lo cual aumenta la cantidad de equipos fuera de servicio por mes, llegando a tener 9 a 10 CAEX fuera de servicio versus los 7 que requiere la operación mina para poder cumplir su plan de producción. Se estimó que la pérdida en movimiento mina (mineral + estéril) del 2021, producto de fallas de los equipos de transporte fue de 2,6 millones de toneladas anuales, lo que se traduce en el 1,7% del movimiento anual presupuestado.

En este trabajo, se utilizan metodologías de análisis de las causas raíz del problema, mediante Pareto y RCA (root cause analysis). Con el análisis de Pareto se llega a la

conclusión de que los problemas principales de indisponibilidad de CAEX son por fallas en motores diésel, siendo sus modos de falla el alto blowby, fugas de refrigerante y fugas de aceite por culata. Para saber las causas raíces de estos 3 modos de falla se utiliza la metodología de análisis 5 por qué, obteniendo los siguientes resultados de sus causas: la alta antigüedad de los motores (block desgastados), siendo 15 de ellos que en 2022 tendrán sobre 60.000 horas, monitoreo de condiciones deficiente ya que el monitoreo de la vida del motor diésel es solo por medio de análisis de aceite, sin contemplar ninguna otra estrategia predictiva. Partidas en frío y falta de experticia técnica de los mecánicos también fueron factores influyentes detectados. Para tomar la decisión de cuál problema se abordará dentro del proyecto del magister MBE, decide priorizar mediante la utilización de la matriz de impacto al negocio versus factibilidad de implementación, llegando a tomar como problema único a solucionar, el de potenciar el proceso de monitoreo de condiciones de motores diésel de la flota de camiones de extracción.

Se evidencia que el proceso de monitoreo de condiciones, desde que se inicia una anomalía en el motor diésel (P en el diagrama P-F) hasta que ocurre una falla imprevista o catastrófica (F en el diagrama), solo utiliza la técnica predictiva de análisis de aceite en sus motores para dar un tiempo remanente de vida. Esto quiere decir que se utiliza solo la experticia técnica y un reporte de análisis de aceite, para tomar la decisión de cuándo debe ser cambiado el motor. Por lo que se implementa un soporte tecnológico al actual proceso de monitoreo de condiciones que apoye a los técnicos de monitoreo a priorizar que equipo debe ser revisado primero, entregar un indicador cuantitativo de vida remanente o RUL de un motor diésel que adiciona variables de presión y temperatura a la ecuación para la toma de decisiones. El tener 2 variables de decisión adicionales para los técnicos de monitoreo, robustece el proceso de monitoreo de condiciones y lo hace más efectivo y reduce su porcentaje de error para la toma de decisión, debido a que los resultados de muestras de aceite más la información proveniente de anomalías en la presión y temperatura de trabajo del motor, genera una caracterización más realista del estado del componente. La utilización de sistemas ya implementados en MLP como lo es el sistema SPECTO son los que darán soporte al modelo de Machine Learning del programa. Por otro lado, se dará soporte a esta solución con un flujograma de comunicación y plan de gestión del cambio, relevado a nivel ejecutivo, que ayude a tomar decisiones de qué hacer con el componente.

Cuando se habla de gestión del cambio, es importante destacar la participación del personal idóneo dentro de la estructura organizacional en donde se implementó el proyecto, con el fin de minimizar la resistencia que podría afectar las modificaciones propuestas al proceso actual de monitoreo de condiciones de la mina. Es vital para la implementación y puesta en práctica, que se identifiquen los grupos de poder necesarios, sin dejar a nadie fuera, ya que estos representan los niveles de la empresa y son las personas que deben estar enteradas de los beneficios que dichos cambios traerán. A su vez se debe brindar toda la información posible al personal, identificando las narrativas y ofertas en cada grupo de poder para evitar resistencias y mostrar que el proyecto traerá consigo nuevos desafíos y beneficios tanto personales como para la empresa.

La implementación del dashboard ha entregado beneficios inmediatos desde el punto de vista de la entrega de información técnica adicional para poder detectar fallas catastróficas en motores diésel. Eso sí, cabe destacar que este dashboard da directrices o esboza posibles causas de falla, pero se requiere la experticia técnica, tanto del mecánico de motores como el de monitoreo de condiciones para sacar el máximo provecho y generar planes de acción adicionales que aporten a mejorar la confiabilidad del componente afectado, los dashboard, están dirigidos principalmente a los encargados de realizar y dar seguimiento al monitoreo de las condiciones para la flota de camiones de extracción de minera los pelambres, ya que son ellos los que poseen los conocimientos técnicos y la experticia necesaria para detectar posibles fallas antes de que éstas se produzcan.

La propuesta tecnológica requirió la data sensorizada del motor diésel desde SPECTO, más el registro de falla de los motores en SAP, esto ya que se requiere de imprevistos y tiempos fuera de servicio para indicar la probabilidad de falla. Respecto a la creación del dashboard, solo se requirió el apoyo de un ingeniero informático más un entorno de programación en la nube para ser creado.

El alcance de los resultados en el dashboard, en este periodo de pruebas, estipuló data histórica pasada, desde abril a julio para realizar pruebas en una población de 9 CAEX de extracción que representan el 17% de la flota completa. Se deduce que de los CAEX analizados, el 105 y 107 presentan en el periodo de 3 meses (abril a julio) la mayor



probabilidad de falla de motor diésel, afectado principalmente por la variable de aumento de presión de combustible. Este hallazgo pudo ser detectado con el uso del dashboard más el apoyo técnico de los mecánicos de motores diésel de la empresa Cummins.

Es destacable que la implementación de esta propuesta tecnológica al actual proceso de monitoreo de condiciones para la flota de camiones de extracción no requiere de una gran infraestructura o de mayores inversiones en lo que se refiere a adquisición de hardware o software. El proyecto está basado en una innovación que permite la mejora en los procesos de mantenimiento de los camiones CAEX solo con la creación de un programa más la adquisición de un computador portátil, lo que demuestra que se puede generar un gran potencial de ahorro con una simple arquitectura tecnológica, eso sí, con una alta complejidad técnica requerida, debido al conocimiento técnico requerido para que este proyecto funcione, siendo en este caso la experticia técnica de los técnicos de monitoreo de condiciones, de los técnicos mantenedores y la experticia del programador para realizar el programa solicitado. Por otro lado, existe un gran potencial de ahorro para el área de mantenimiento con una baja inversión, esto debido a los altos precios de venta que se manejan en la minería de gran escala, sobretodo en el proceso de camiones de extracción en donde una sola unidad de motor diésel cuesta alrededor de 1,2 millones de dólares. El hecho de evitar un daño catastrófico al año que deje el motor inutilizable, se está generando un retorno de la inversión por sobre el 63.000% debido al bajo costo de la propuesta tecnológica.

Los beneficios reales todavía se encuentran en evaluación, pero se estima que poder detectar la causa de este modo de falla podría también impactar positivamente en 0,2% de disponibilidad por efecto de mejorar la confiabilidad de los motores diésel de peor desempeño en el año, los cuales son el equipo CAEX 102 y 105. Por otro lado, de salvar el motor por este tema, se tendría un ahorro de 1,2 millones de dólares por el ahorro de 1 motor por año, tanto en el CAEX 105 y 107.

Como próximos pasos se requiere habilitar una base de datos robusta en entorno SQL actualizable para que los resultados del dashboard se entreguen en tiempo real. Por otro lado, también se requiere nutrir la base de datos con imprevistos en SAP actualizable de forma diaria, lo que permitirá un manejo de los datos más real y preciso.

## CAPITULO 9: BIBLIOGRAFÍA

- AMSA. (2021). *Minera Los Pelambres*. Obtenido de <https://www.aminerals.cl/que-hacemos/nuestras-companias/chile/minera-los-pelambres/>
- Barros, O. (2000). *Rediseño de Procesos de Negocios Mediante el Uso de Patrones*. Santiago: Dolmen.
- Baru, A. (2018). *Tres formas de estimar la vida útil restante para el mantenimiento predictivo*. Obtenido de [https://www-mathworks-com.translate.google.com/company/newsletters/articles/three-ways-to-estimate-remaining-useful-life-for-predictive-maintenance.html?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es-419](https://www-mathworks-com.translate.google.com/company/newsletters/articles/three-ways-to-estimate-remaining-useful-life-for-predictive-maintenance.html?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es-419)
- Betancourt, D. F. (1 de Septiembre de 2018). *Ingenio Empresa*. Obtenido de [www.ingenioempresa.com/analisis-pestel](http://www.ingenioempresa.com/analisis-pestel)
- Chile, C. (2017). *MONITOREO DE MOTORES*. Obtenido de <https://www.cummins.cl/mining/monitoreo/>
- Chilena, M. (03 de Agosto de 2022). *Análisis de GEM plantea que la Nueva Constitución desincentiva a la minería sobre otras actividades*. Obtenido de <https://www.mch.cl/2022/08/03/analisis-de-gem-plantea-que-la-nueva-constitucion-desincentiva-a-la-mineria-sobre-otras-actividades/>
- Cochilco. (2021). *Informe de tendencias del mercado del cobre*. Obtenido de <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Inf.%20Tendencias%20Mercado%20del%20Cobre%20Proy%202021-2022%20Q1%202021.pdf>
- Coetzee, J. (2010). *Maintenance Publishers Ltd Republic of South África*. África.
- Consejominero. (2020). *Minería 2020: Competitividad y Desarrollo*. Obtenido de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/04/Miner%C3%ADa-2020-Consejo-Minero.pdf>
- Cummins. (2021). *Motor Cummins QSK60*. Obtenido de <https://www.cummins.com/engines/qsq60>
- DÍAZ, M. I. (2019). ANÁLISIS PREDICTIVO DE ACTIVOS MINEROS PARA OBTENCIÓN DE INTERVALO DE FALLA MEDIANTE ALGORITMOS DE MACHINE LEARNING.
- Dieselval.com. (2021). *5 piezas o partes fundamentales que componen un motor diésel*. Obtenido de <https://dieselval.com/5-piezas-o-partes-fundamentales-que-componen-un-motor-diesel/>
- Educa, C. (2018). *¿Cómo se vende el Cobre?* Obtenido de [https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/como\\_sevende.html#:~:text=La%20Bolsa%20de%20Metales%20de,de%20varios%20metales%20no%20ferrosos](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/como_sevende.html#:~:text=La%20Bolsa%20de%20Metales%20de,de%20varios%20metales%20no%20ferrosos)
- Gonzales, M. A. (2013). *Mejora en los procesos de evaluación de riesgo de PCR e IIH en el hospital Exequiel Gonzales Cortes*. Santiago de Chile.
- Julio, C. (2020). *Arquitectura de Procesos, Análisis estratégico de diseño de procesos*.
- Komatsu. (2021). *Komatsu 930E-4SE Specifications*. Obtenido de <https://www.komatsu.com/en/products/trucks/electric-drive-mining-trucks/930e-4se/>
- Linares, O. (2010). *Generalidades de la Tribología Fundamentos de la Lubricación, Fricción y el Desgaste*. Reporte técnico.
- LosPelambres. (2021). *Nuestro compromiso con nuestros trabajadores*. Obtenido de <https://web.pelambres.cl/nuestros-compromisos/nuestro-compromiso-con-los-trabajadores/>
- Maisueche Cuadrado, A. (2019). *Utilización del Machine Learning en la industria 4.0*.
- mch.cl. (2021). *El impacto del factor político y social en la caída de Chile en el ranking Fraser*. Obtenido de 4) <https://www.mch.cl/2021/02/23/el-impacto-del-factor-politico-y-social-en-la-caida-de-chile-en-el-ranking-fraser/#>

- Minero, C. (2019). *Minería en Chile*. Obtenido de <https://consejominero.cl/chile-pais-minero/aprende-de-mineria/mineria-en-chile/>
- Moffat, K., Boughen, N., Zhang, A., Lacey, J., Fleming, D., & Uribe, K. (2014). *Percepciones chilenas hacia la minería, encuesta a la ciudadanía, resultados 2014*.
- Motorservice. (2020). *Función del cigueñal*. Obtenido de <https://www.ms-motorservice.com/es/tecnipedia/post/funcion-del-cigueenal/>
- Muñoz, E., & Vergara Silva, C. (2021). *Rediseño de procesos y uso Frameworks*. Santiago.
- Pelambres. (2020). *Proceso Productivo Los Pelambres*. Obtenido de <https://web.pelambres.cl/que-hacemos/proceso-productivo/>
- Pelambres, M. L. (Diciembre de 2021). *Proceso Productivo Minera Los Pelambres*. Obtenido de <https://web.pelambres.cl/que-hacemos/proceso-productivo>
- Pérez, A. (29 de Abril de 2021). *Cinco pasos clave para establecer una metodología de gestión por proyectos*. Obtenido de <https://www.obsbusiness.school/blog/cinco-pasos-clave-para-establecer-una-metodologia-de-gestion-por-proyectos#:~:text=Una%20metodolog%C3%ADa%20es%20un%20conjunto,conjunto%20de%20m%C3%A9todos%20de%20trabajo.>
- Propymes. (2014). *Programa: Gestión del mantenimiento*. Argentina.
- Rojas, H. D. (Marzo de 2008). *La Ingeniería de Negocios*. Obtenido de [https://www.docirs.cl/ingenieria\\_negocios\\_hernandezdemedina.htm](https://www.docirs.cl/ingenieria_negocios_hernandezdemedina.htm)
- Román, V. (6 de Febrero de 2019). *Introducción al Machine Learning: Una Guía Desde Cero*. Obtenido de <https://medium.com/datos-y-ciencia/introduccion-al-machinelearning-una-gu%C3%ADa-desde-cero-b696a2ead359>
- Saavedra, P., & Ledermann, C. R. (2000). *Mantenimiento predictivo en palas electromecánicas de la minería*. Obtenido de [https://www.academia.edu/7352749/MANTENIMIENTO\\_PREDICTIVO\\_EN\\_PALAS\\_ELECTROMECANICAS\\_DE\\_LA\\_MINERIA](https://www.academia.edu/7352749/MANTENIMIENTO_PREDICTIVO_EN_PALAS_ELECTROMECANICAS_DE_LA_MINERIA)
- Sanz, F. (2018). *Cómo funciona el algoritmo XGBoost en Python*. Obtenido de <https://www.themachinelearners.com/xgboost-python/>
- Silva, L. (27 de Agosto de 2021). *Principales tipos de mantenimiento industrial + 7 sugerencias para escoger*. Obtenido de <https://blog-es.checklistfacil.com/tipos-de-mantenimiento/>
- Spiegato. (2022). *Spiegato: ¿Que es un activo físico?* Obtenido de <https://spiegato.com/es/que-es-un-activo-fisico>
- Tianqi, C., & Guestrin, C. (2016). *XGBoost: A scalable tree boosting system*. Obtenido de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/geoai/how-xgboost-works.htm#:~:text=XGBoost%20es%20la%20abreviatura%20de,aleatorio%20y%20refuerzo%20de%20gradientes.>
- Tusell, F. (2011). *Análisis de Regresión. introducción teórica y práctica basada en R*. Bilbao.
- Vega, J. B. (2020). *Tutorial: XGBoost en Python*. Obtenido de <https://medium.com/@jboscomendoza/tutorial-xgboost-en-python-53e48fc58f73>
- Villén, M. (14 de Abril de 2019). *Big Data Analytics y la inteligencia Artificial*. Obtenido de <https://www.caminosmadrid.es/9938-2>