



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**MEJORAS TÉCNICAS ENFOCADAS AL AUMENTO DE DISPONIBILIDAD  
DE LOS SISTEMAS DE IMPULSIÓN DE ARENAS DEL TRANQUE EL  
TORITO, EL SOLDADO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA

CONSTANZA PAZ CARREÑO RAMÍREZ

PROFESOR GUÍA:  
ENRIQUE LÓPEZ DROGUETT

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
VIVIANA MERUANE NARANJO  
SEBASTIÁN TAPIA NÚÑEZ

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:  
Anglo American

SANTIAGO DE CHILE

2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO INGENIERA CIVIL MECÁNICA  
POR: CONSTANZA PAZ CARREÑO RAMÍREZ  
FECHA: 2022  
PROF. GUÍA: ENRIQUE LÓPEZ DROGUETT

## MEJORAS TÉCNICAS ENFOCADAS AL AUMENTO DE DISPONIBILIDAD DE LOS SISTEMAS DE IMPULSIÓN DE ARENAS DEL TRANQUE EL TORITO, EL SOLDADO

Es necesario realizar un estudio del funcionamiento del Tranque de Relaves El Torito, identificando falencias en su operación e incorporar nuevas tecnologías que potencien el rendimiento de las bombas de los sistemas de impulsión de arenas, para que estas operen hasta el año 2027 con las futuras condiciones del muro de contención.

El objetivo general del trabajo es evaluar técnica y económicamente la operación de los Sistemas de Bombas Ash y Abel que construyen el muro del Tranque de relaves El Torito, para proponer mejoras técnicas que potencien su funcionamiento, cumpliendo con los estándares de la operación del tranque. Los objetivos específicos son: i. Caracterizar y analizar el estado actual en cuanto a productividad y mantenimiento; ii. Cuantificar indicadores de mantenimiento y económicos, dando énfasis a los modos de falla más relevantes y su impacto en el gasto anual; iii. Estudiar la implementación de nuevas tecnologías para complementar los análisis de mantenimiento; iv. Identificar y analizar los puntos críticos presentes en la operación y en el mantenimiento con posibilidades de mejora; v. Desarrollar propuestas de mejoras técnicas en base a puntos críticos, capaces de potenciar y optimizar el funcionamiento de cada sistema; y vi. Evaluar técnica-económicamente las propuestas de mejora, con la condición de cumplir con los requerimientos del Tranque de Relaves.

La metodología a utilizar consiste en: Recopilación de información, Caracterización del estado actual, Análisis e identificación de puntos críticos en la operación, Selección de oportunidades de mejoras técnicas y Evaluación técnico-económica de las propuestas de mejora.

Los principales resultados y conclusiones son: Las mejoras propuestas buscan aumentar la disponibilidad del sistema, enfocándose en cambios de infraestructuras y tecnológicos para cada bomba. Se desarrollan modelos de Deep Learning para Pronóstico y Diagnóstico de los sistemas actuales, para probar nuevas tecnologías con la información disponible. En los resultados se obtienen AUC mayores al 0,8. La evaluación final del proyecto de inversión para las Bombas Ash posee un VAN de -30.865[CC] con un PRI de 6,1 años. Para el caso de las Bombas Abel, el VAN es de 40.751[CC] con un PRI de 1,9 años.

*El que cree que lo sabe todo es incapaz de aprender.*

*Y como dice el Snoop dog  
Por último, pero no menos importante, quiero agradecerme  
Por hacer todo este trabajo duro  
Por no tener días libres  
Y por creer en mi.*

# Agradecimientos

Quiero comenzar este espacio para dedicárselo a mi familia, a mis padres Agustina y Juan por todas las oportunidades que me han brindado en estos 7 años de estudio, a mis hermanos Sebastián y Marcela con su familia, y a Miguel, quien me ayudó y acompañó los últimos 4 años y sobretodo durante este último periodo, el más duro y complejo de toda la carrera.

A mis amigos de la universidad, en su gran mayoría a la bachigente, al Sebi, al Nachito por aguantar mis periodos de estrés, al Roberto por estar ahí en los buenos y malos momentos, al Alonso por sus salidas de trekking y al Manu por su paciencia en enseñarme todas las materias en las que alguna vez necesité su ayuda. También a la gente de mecánica, a la salita de memoristas por ser un apoyo moral para tod@s los que nos encontramos en el mismo proceso.

Al grupo de Difusión, a la Pili y a la María José, por hacer de ese espacio un lugar de crecimiento y desarrollo personal.

También agradecer a Álvaro Berenguela, por darme la oportunidad de realizar este trabajo de memoria en Angloamerican, a Ernesto Pacheco por su acompañamiento durante todo el periodo y brindarme la ayuda cuando fue necesaria, a Sebastián Tapia y Francisco Castro por recibirme en la Planta y el Tranque, por su apoyo cuando tuve varias dudas en la realización de la memoria. Finalmente a mis compañeras de memoria y a Francisco Vicuña, por tener siempre la disposición de llevarme a El Soldado desde Santiago.

Finalmente agradecer a mi comisión por el apoyo y la guía brindada en este periodo, a la profesora Viviana Meruane y al profesor Enrique López, por la disposición, paciencia y consejos durante este tiempo, aún encontrándose en otro país.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes generales . . . . .	1
1.1.1. Anglo American . . . . .	1
1.1.2. El Soldado . . . . .	1
1.2. Motivación . . . . .	3
1.3. Objetivo general . . . . .	4
1.4. Objetivos específicos . . . . .	4
1.5. Alcances . . . . .	4
<b>2. Antecedentes específicos</b>	<b>5</b>
2.1. Depósitos de relaves . . . . .	5
2.1.1. Tipos de Depósitos de Relaves . . . . .	5
2.1.1.1. Tranque de Relaves . . . . .	5
2.1.2. Tipos de construcción Tranque de Relaves . . . . .	6
2.1.3. Partes de un Depósito de Relaves . . . . .	6
2.2. Tranque de Relaves El Torito - El Soldado . . . . .	8
2.2.1. Crecimiento del Tranque . . . . .	9
2.2.2. Descripción general de Obras . . . . .	10
2.2.2.1. Muro . . . . .	10
2.2.2.2. Diagrama de flujo Tranque El Torito . . . . .	10
2.2.2.3. Sistema de selección, transporte y distribución de relaves . . . . .	11
2.3. Sistemas de Impulsión de Arenas . . . . .	12
2.3.1. Sistema Ash . . . . .	12
2.3.1.1. Datos técnicos . . . . .	12
2.3.1.2. Funcionamiento . . . . .	13
2.3.2. Sistema Abel . . . . .	14
2.3.2.1. Datos técnicos . . . . .	14
2.3.2.2. Funcionamiento . . . . .	16
2.3.3. Sistema Curve . . . . .	17
2.4. Indicadores operacionales . . . . .	18
2.5. Indicadores de mantenimiento . . . . .	18
2.5.1. Análisis de Pareto . . . . .	18

2.5.2.	Mean Time to Repair [MTTR]	19
2.5.3.	Mean Time Between Failure [MTBF]	20
2.6.	Detector de anomalías	20
2.6.1.	Preprocesamiento	21
2.6.1.1.	Análisis de Componentes Principales [PCA]	23
2.6.2.	Modelos	24
2.6.2.1.	Autoencoder	24
2.6.2.2.	Redes neuronales recurrentes convencionales [RNN]	25
2.6.2.3.	Redes LSTM	26
2.6.2.4.	Función de activación	26
2.6.2.5.	Curva ROC	28
2.6.2.6.	Matriz de confusión	29
2.7.	Evaluación económica	29
2.7.1.	Costo de kilotonelada de arena	30
2.7.2.	Costo por día de trabajo	30
2.7.3.	Costo mensual de funcionamiento	31
2.7.4.	Desglose costo por kilotonelada	31
2.7.5.	Periodo de retorno de la inversión [PRI]	31
2.7.6.	Valor actual neto [VAN]	32
2.7.7.	Tasa interna de retorno [TIR]	32
<b>3.</b>	<b>Metodología</b>	<b>33</b>
3.1.	Recopilación de información	33
3.1.1.	Levantamiento de detenciones y fallas	33
3.1.2.	Extracción data PI	35
3.2.	Caracterización del estado actual	36
3.3.	Análisis e identificación de puntos críticos de la operación	36
3.3.1.	Detección de anomalías	36
3.4.	Selección de oportunidades de mejoras técnicas	38
3.5.	Evaluación técnico-económica de las propuestas de mejora	38
<b>4.</b>	<b>Resultados</b>	<b>40</b>
4.1.	Estado operacional	40
4.1.1.	Sistema Ash	43
4.1.2.	Sistema Abel	44
4.2.	Estado de mantenimiento	46
4.2.1.	Sistema Ash	46
4.2.1.1.	Análisis de pareto	48
4.2.1.2.	Indicadores de mantenimiento	53
4.2.2.	Sistema Abel	56
4.2.2.1.	Análisis de pareto	58
4.2.2.2.	Indicadores de mantenimiento	62

4.3.	Detector de anomalías . . . . .	64
4.3.1.	Detector de anomalías - Bombas Ash . . . . .	65
4.3.1.1.	Preprocesamiento . . . . .	65
4.3.1.2.	Diagnóstico . . . . .	66
4.3.1.3.	Pronóstico . . . . .	69
4.3.2.	Detector de anomalías - Bombas Abel . . . . .	71
4.3.2.1.	Preprocesamiento . . . . .	71
4.3.2.2.	Diagnóstico . . . . .	75
4.3.2.3.	Pronóstico . . . . .	77
4.4.	Mejoras técnicas . . . . .	80
4.4.1.	Mejoras técnicas Sistema Ash . . . . .	80
4.4.1.1.	Aumento de disponibilidad de equipos . . . . .	82
4.4.1.2.	Aumento de monitoreo en parámetros operacionales . . . . .	83
4.4.2.	Mejoras técnicas Sistema Abel . . . . .	84
4.5.	Evaluación económica . . . . .	86
4.5.1.	Gasto anual 2021 . . . . .	86
4.5.2.	Beneficios . . . . .	89
4.5.2.1.	Beneficios mejoras técnicas - Bombas Ash . . . . .	89
4.5.2.2.	Beneficios mejoras técnicas - Bombas Abel . . . . .	90
4.5.3.	Costos . . . . .	90
4.5.4.	Proyecto de inversión . . . . .	90
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>93</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>95</b>
	<b>Anexos</b>	<b>98</b>
A.	Plano muro Tranque de Relaves . . . . .	98
A.1.	Nudos de descarga . . . . .	99
B.	Indicadores de Mantenimiento . . . . .	100
B.1.	Detenciones por mes Bombas Ash. . . . .	101
B.2.	Detenciones por mes Bombas Abel. . . . .	102
B.3.	Indicadores mensuales Bombas Ash. . . . .	103
B.4.	Indicadores mensuales Bombas Abel. . . . .	104

# Índice de Tablas

2.1.	Crecimiento Muro de Arena - Tranque El Torito.[10]	9
2.2.	Datos técnicos de Bomba Ash.	12
2.3.	Materiales Bomba Ash	12
2.4.	Datos técnicos de Bombas Abel.	14
2.5.	Materiales Bombas Abel.	14
2.6.	Parámetros de operación mensuales. Fuente: Elaboración propia.	17
3.1.	TAGs con su respectiva fecha de obtención y descripción para Sistema Abel.	35
3.2.	TAGs con su respectiva fecha de obtención y descripción para Sistema Ash.	35
4.1.	Plan de depositación de arenas vs arenas depositadas año 2021.	40
4.2.	Horas de trabajo planificadas vs horas de trabajo reales en Sistemas de arenas, año 2021.	41
4.3.	Parámetros operacionales año 2021 para Sistemas de Arenas.	42
4.4.	Información operacional disponible Sistema Ash, año 2021.	43
4.5.	Tasa de depositación por hora para el Sistema Ash, año 2021.	44
4.6.	Información operacional disponible Sistema Abel, año 2021.	45
4.7.	Tasa de depositación por hora para el Sistema Abel, año 2021.	45
4.8.	Horas de funcionamiento y detención para periodo Sistema Ash	46
4.9.	Detalle de los tipos de detenciones Sistema Ash.	47
4.10.	Modos de falla para Detenciones operacionales, Sistema Ash.	49
4.11.	Modos de falla para Detenciones MNP, Sistema Ash.	51
4.12.	Modos de falla para Detenciones MP, Sistema Ash.	53
4.13.	Información mensual KPI's de mantenimiento puntos críticos, MTBF.	53
4.14.	Información mensual KPI's de mantenimiento puntos críticos, MTTR, Sistema Ash.	55
4.15.	Horas de funcionamiento y detención para periodo Sistema Abel.	56
4.16.	Detalle de los tipos de detenciones Sistema Abel.	57
4.17.	Modos de falla para Detenciones operacionales Sistema Abel.	58
4.18.	Modos de falla para Detenciones MNP, Sistema Abel.	60
4.19.	Modos de falla para Detenciones MP, Sistema Abel.	62
4.20.	Información mensual KPI's de mantenimiento puntos críticos, MTBF.	62
4.21.	Información mensual KPI's de mantenimiento puntos críticos, MTTR, Sistema Abel.	63
4.22.	Cantidad de valores nulos para Bombas Ash.	65

4.23.	Valores aritméticos para sensores, Bombas Ash. . . . .	66
4.24.	Cantidad de etiquetas en total de data. . . . .	66
4.25.	Parámetros de validación, Diagnóstico Bombas Ash. . . . .	67
4.26.	Parámetros de validación, Pronóstico Bombas Ash. . . . .	69
4.27.	Parámetros de validación, Pronóstico de prueba Bombas Ash. . . . .	71
4.28.	Valores nulos para cada sensor, Bombas Abel. . . . .	72
4.29.	Datos aritméticos de la data de sensores, Bombas Abel. . . . .	72
4.30.	Varianza acumulada PCA, Bombas Abel. . . . .	75
4.31.	Cantidad de etiquetas en total de data. . . . .	75
4.32.	Parámetros de validación, Diagnóstico Bombas Abel. . . . .	76
4.33.	Parámetros de validación, Pronóstico Bombas Abel. . . . .	77
4.34.	Parámetros de validación, Pronóstico de prueba Bombas Abel. . . . .	79
4.35.	Acumulado horas para modos de falla destacados, Bombas Ash . . . . .	81
4.36.	Acumulado horas para modos de falla destacados, Bombas Abel . . . . .	84
4.37.	Gasto anual para las Bombas de arenas en CC, año 2021. . . . .	86
4.38.	Gasto anual por área las Bombas de arenas en CC, año 2021. . . . .	87
4.39.	Desglose del gasto anual por área en CC, año 2021. . . . .	88
4.40.	Desglose de los costos por kilotonelada . . . . .	89
4.41.	Indicadores diarios y mensuales de gastos, Sistema Ash 2021. . . . .	89
4.42.	Indicadores diarios y mensuales de gastos, Sistema Abel 2021. . . . .	89
4.43.	Ahorro económico por mejoras técnicas, Sistema Ash. . . . .	89
4.44.	Ahorro económico por mejoras técnicas, Sistema Abel. . . . .	90
4.45.	Costos total de las mejoras técnicas propuestas. . . . .	90
4.46.	Proyecto de inversión, Sistema Ash. . . . .	91
4.47.	Indicadores para Proyecto de inversión Sistema Ash. . . . .	91
4.48.	Proyecto de inversión, Sistema Abel. . . . .	91
4.49.	Indicadores para Proyecto de inversión Sistema Abel. . . . .	92
B.1.	Tiempo y cantidad de detenciones por categoría mensual. . . . .	101
B.2.	Tiempo y cantidad de detenciones por categoría mensual. . . . .	102
B.3.	Información mensual KPI's de mantenimiento. . . . .	103
B.4.	formación mensual KPI's de mantenimiento. . . . .	104

# Índice de Ilustraciones

1.1.	Diagrama de flujo de procesos. Fuente: Anglo American . . . . .	2
2.1.	Esquema para un Tranque de Relaves.[6] . . . . .	6
2.2.	Esquema para Método de Construcción Eje Central.[6] . . . . .	6
2.3.	Esquema para un Tranque de Relaves.[6] . . . . .	7
2.4.	Área del Tranque de Relaves El Torito. . . . .	9
2.5.	Diagrama de flujo del Tranque El Torito.[10] . . . . .	10
2.6.	Bombas Ash. . . . .	13
2.7.	Prototipo Bomba Abel HMQ con partes especificadas. . . . .	15
2.8.	Bomba Abel 3. . . . .	15
2.9.	Bomba Abel 2. . . . .	16
2.10.	Bombas Curve. . . . .	17
2.11.	Ejemplo Gráfico de Pareto.[11] . . . . .	19
2.12.	Selección de componentes principales del algoritmo PCA[14]. . . . .	23
2.13.	Gráfico acumulación de varianza para PCA[14]. . . . .	24
2.14.	Ejemplo de arquitectura propuesta por Autoencoder.[15]. . . . .	25
2.15.	Función Tanh y su derivada[19]. . . . .	27
2.16.	Función ReLU y su derivada[19]. . . . .	27
2.17.	Curva ROC[14]. . . . .	28
2.18.	Ejemplo Matriz de Confusión para clasificador perfecto[21]. . . . .	29
3.1.	Metodología utilizada para realización de Detector de Anomalías. . . . .	37
4.1.	Budget mensual de arenas vs cantidad real depositada año 2021. . . . .	42
4.2.	Participación por sistema . . . . .	42
4.3.	Rendimiento Bombas Ash, año 2021. . . . .	44
4.4.	Rendimiento Bombas Abel, año 2021. . . . .	45
4.5.	Horas operativas vs horas detenidas, periodo de estudio. . . . .	47
4.6.	Detenciones en función de las horas acumuladas, periodo de estudio Sistema Ash. . . . .	48
4.7.	Análisis de Pareto para detenciones operacionales, Sistema Ash. . . . .	50
4.8.	Análisis de Pareto para detenciones MNP, Sistema Ash. . . . .	52
4.9.	Valores mensuales de MTBF vs Arenas depositadas, Sistema Ash. . . . .	54
4.10.	Valores mensuales de MTTR vs Arenas depositadas, Sistema Ash. . . . .	55
4.11.	Horas operativas vs horas detenidas, Sistema Abel. . . . .	56
4.12.	Resumen detenciones, Sistema Abel. . . . .	57
4.13.	Análisis de Pareto para Detenciones operacionales, Sistema Abel. . . . .	59

4.14.	Análisis de Pareto para detenciones MNP, Sistema Abel. . . . .	61
4.15.	Valores mensuales de MTBF vs Arenas depositadas, Sistema Abel. . . . .	63
4.16.	Valores mensuales de MTTR vs Arenas depositadas, Sistema Abel. . . . .	64
4.17.	Histogramas de sensores Sistema Ash. . . . .	65
4.18.	Curva ROC Diagnóstico Bombas Ash. . . . .	67
4.19.	Matriz de confusión Diagnóstico Bombas Ash. . . . .	68
4.20.	Curva ROC Pronóstico Bombas Ash. . . . .	69
4.21.	Matriz de confusión Pronóstico Bombas Ash. . . . .	70
4.22.	Resultados de pronóstico a 180 minutos al futuro. . . . .	70
4.23.	Histogramas de sensores Bomba 1 Abel. . . . .	73
4.24.	Histogramas de sensores construidos con Bomba 2 y 3 Abel. . . . .	73
4.25.	Matriz de correlación entre sensores Sistema Abel. . . . .	74
4.26.	Gráfico de varianza acumulada para PCA, Sistema Ash. . . . .	74
4.27.	Curva ROC Diagnóstico Bombas Abel. . . . .	76
4.28.	Matriz de confusión Diagnóstico Bombas Abel. . . . .	77
4.29.	Curva ROC Pronóstico Bombas Abel. . . . .	78
4.30.	Matriz de confusión Pronóstico Bombas Abel. . . . .	78
4.31.	Resultados de pronóstico a 180 minutos al futuro. . . . .	79
4.32.	Nuevo tren de Bombas Ash con su disposición espacial[22] . . . . .	83
4.33.	Ejemplo de interfaz de monitoreo del sistema iConSys[24]. . . . .	86
4.34.	Proporción del gasto anual por cada sistema de bombas.. . . . .	87
4.35.	Proporción de gastos de Operación y Mantenimiento por sistema. . . . .	87
4.36.	Desglose de costos por kilotonelada. . . . .	88
A.1.	Plano con nudos de descarga en Muro Tranque El Torito.[10] . . . . .	99

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes generales

#### 1.1.1. Anglo American

Anglo American es una compañía minera dedicada a la explotación de los siguientes recursos naturales: diamantes, cobre, níquel, hierro mineral, carbón térmico y metalúrgico y platino. En Chile pertenece al sector privado de la explotación de la minería cuprífera, teniendo intereses en cuatro operaciones de cobre en el país. El principal negocio de estas operaciones es producir y comercializar concentrado de cobre, cátodos de cobre y productos secundarios como molibdeno y plata. Para ello poseen el 50,1 % de las minas Los Bronces y El Soldado y de la Fundición Chagres. Además poseen una participación del 44 % en la compañía minera Doña Inés de Collahuasi.[1]

Actualmente, Anglo American está en búsqueda de nuevas formas de extraer y procesar sus productos con ayuda de nuevas tecnologías, permitiendo una extracción más precisa y sustentable con el entorno. Todo esto lo alcanzan mediante un menor uso del agua y la energía en sus procesos. El objetivo es construir un futuro más auspicioso y saludable en torno a las operaciones, comunidades y para todas las personas del mundo entero que son dependientes de sus productos para la vida cotidiana.[2] Esta es la razón por la cual Anglo American está re-imaginando la minería para mejorar la vida de las personas.[2]

#### 1.1.2. El Soldado

La operación El Soldado se localiza en la Región de Valparaíso, Provincia de Quillota, Comuna de Nogales, a 132 kilómetros de Santiago y a una altura promedio aproximada de 600 m.s.n.m. Es una mina de cobre a cielo abierto que, hasta enero del año 2020, cuenta con 1698 trabajadores aproximadamente. Produce concentrado de cobre y plata como subproducto.[3]

El lugar donde se ubica la operación es especial por la naturaleza nativa que posee, impactando en las aprobaciones sociales para el desarrollo minero. Adicional a esto, el clima

en los últimos años ha sido más seco de lo normal, lo cual impacta en el suministro de agua para El Soldado y las comunidades, siendo un desafío para ambas buscar nuevas fuentes sustentables.[4]

El Soldado es un yacimiento de óxidos y sulfuros de cobre a rajo abierto, donde procesa el mineral a través de los procesos de chancado en las Plantas de Chancado y los procesos de molienda, flotación, espesamiento y filtrado en la Planta Concentradora El Cobre. Los relaves producto del proceso son conducidos al Tranque El Torito.[4]

El proceso de El Soldado para obtener concentrado de cobre se puede observar en la Figura 1.1, donde se comienza con la obtención del mineral en el rajo. Acá, las grandes rocas obtenidas pasan por el proceso de chancadores para seguir a la molienda convencional o molienda SAG. Luego del proceso de molienda, el cobre, ya más fino, sigue a la flotación, punto donde se separa el cobre más puro del resto de los minerales. El cobre obtenido sigue a la sección de filtrado y el material rechazado con impurezas se va directo al Tranque de relaves. El concentrado de cobre obtenido en la operación, el cual alcanza un 30% de pureza aproximadamente, se traslada hacia la Fundición Chagres para continuar el proceso.[4]

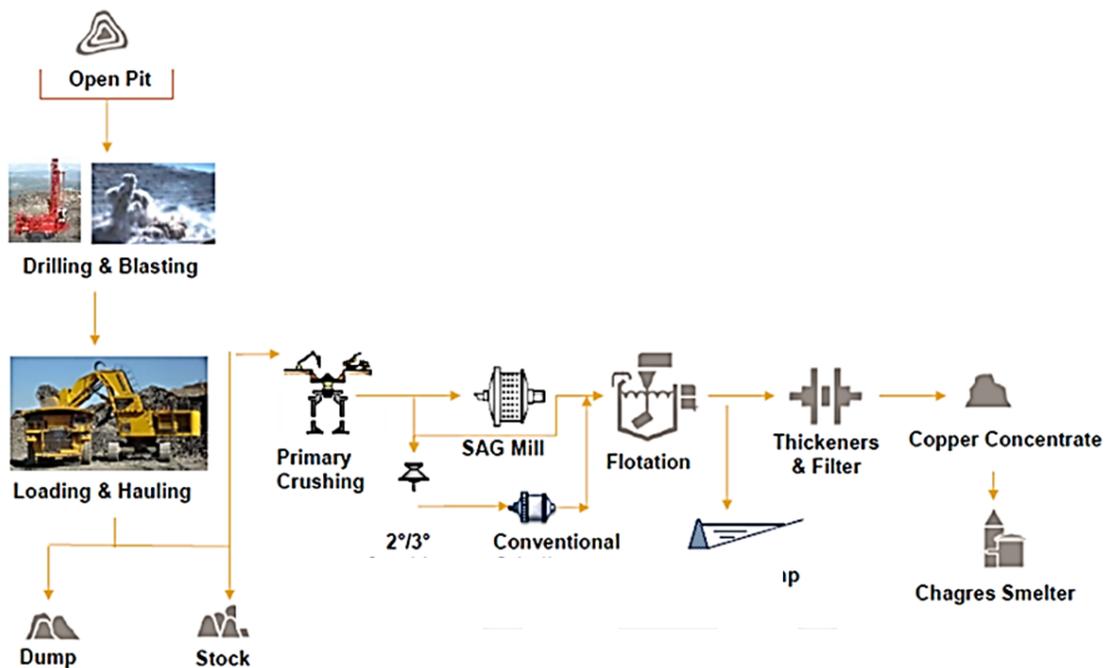


Figura 1.1: Diagrama de flujo de procesos.  
Fuente: Anglo American

## 1.2. Motivación

Parte importante del crecimiento económico del país se basa en la minería. Para el año 2020, su producción a nivel nacional alcanzó los 5,77 millones de toneladas métricas finas, lo que posicional a Chile como el primer productor mundial de cobre con 28,5 % de la producción mundial. En cuanto a la economía nacional, en el 2020 la contribución de la minería en el PIB alcanzó al 12,5 %, y en este, la participación de la minería de cobre fue de 11,2 %.[5]

Según la consultora británica Roskill[7], la demanda de cobre mundial aumentará en un 28 % durante la próxima década. Predice que el consumo mundial de cobre crecerá de 30 millones de toneladas [Mt] en 2020 a 38 [Mt] para 2030. Este crecimiento estará liderado por China, país que actualmente representa el 56 % del consumo mundial de cobre refinado.

Esta proyección de aumento en la demanda de cobre mundial es un desafío para Chile. En primer lugar, el país tendrá que elevar considerablemente su producción del mineral, lo que, sumado a la disminución en las leyes, se convierte en un aumento de volumen de los desechos del proceso productivo. De acuerdo con el Programa de Minería Alta Ley, para el año 2035 se espera que la generación de relaves aumente de 600 a 1.100 millones de toneladas por año. En segundo lugar, este aumento de producción debe poseer un desarrollo sustentable con el medio ambiente y las comunidades, dando énfasis en el uso responsable del agua.

Esto genera la importancia de analizar e identificar las falencias que presenta la operación de los tranques de relaves, ya que su rol es fundamental en la industria: Sin un tranque de relaves que cumpla con todas las normas en su construcción y operación, pone en riesgo el proceso minero del cual forma parte, llevando incluso al cierre de la operación.

Con todo lo anterior, surge la necesidad de estudiar el funcionamiento y operación del Tranque de Relaves EL Torito, como parte del contexto de Transformación que vive la operación El Soldado actualmente. Además, sumado a la creciente crisis hídrica que sufre la Región de Valparaíso, es importante identificar y generar mejoras que permitan progresar positivamente bajo las condiciones de operación ya determinadas. Como parte de este estudio, se analizará el comportamiento operativo y de mantenimiento de los Sistemas de impulsión de arenas en el muro, con el fin de identificar y proponer mejoras técnicas para potenciar la operación de las bombas existentes y asegurar su rendimiento para las condiciones futuras de operación.

### **1.3. Objetivo general**

Evaluar técnica y económicamente la operación de los Sistemas de Bombas Ash y Abel que construyen el muro del Tranque de relaves El Torito, para proponer mejoras técnicas que potencien su funcionamiento, cumpliendo con los estándares de la operación del tranque.

### **1.4. Objetivos específicos**

i. Caracterizar y analizar el estado actual en cuanto a movimiento y depositación de arenas y mantenimiento.

ii. Cuantificar indicadores de mantenimiento y económicos, dando énfasis a los modos de falla más relevantes y su impacto en el gasto anual.

iii. Estudiar la implementación de nuevas tecnologías para complementar los análisis de mantenimiento.

iv. Identificar y analizar los puntos críticos presentes en la operación y en el mantenimiento con posibilidades de mejoras.

v. Desarrollar propuestas de mejoras técnicas en base a puntos críticos, capaces de potenciar el funcionamiento de cada sistema.

vi. Evaluar técnica-económicamente las propuestas de mejora, con la condición de cumplir con los requerimientos del Tranque de Relaves.

### **1.5. Alcances**

Este trabajo se enfocará en realizar un estudio del estado de operación y mantenimiento de los Sistemas de Bombas Ash y Abel existentes en el Tranque El Torito, con el objetivo de identificar y proponer potenciales mejoras técnicas que cumplan con los parámetros de operación del Tranque y que brinden mayores beneficios en la operación. Estos beneficios se clasificarán en mejoras en el rendimiento de cada bomba y en beneficios económicos. El impacto de las propuestas de mejoras técnicas solo se estudiarán de manera teórica y no se llegará a la implementación real de ellas.

# Capítulo 2

## Antecedentes específicos

### 2.1. Depósitos de relaves

El relave es un sólido finamente molido, que corresponde al material con bajo contenido de minerales y que es rechazado en el proceso minero, especialmente en la minería de sulfuros de cobre. Se generan y desechan por las Plantas Concentradoras y corresponden a una pulpa con suspensión de sólidos finos dentro de ella.[8]

Para su almacenamiento y aislación con el medio ambiente, es necesario diseñar y construir los Depósitos de Relaves, los cuales están reglamentados por el Decreto Supremo N° 248. Su principal función es la de servir como depósitos de los materiales sólidos proveniente desde la Planta, permitiendo así la recuperación del agua que transporta la pulpa del relave.[9]

#### 2.1.1. Tipos de Depósitos de Relaves

Actualmente, existen varios tipos de relaves los cuales varían según la cantidad de agua que posee el relave y según la forma de construcción de este. De acuerdo a la forma de almacenamiento, el Decreto Supremo 248 [9] describe 5 tipos distintos de depósitos, los cuales se diferencian en su forma de construcción y el tratamiento realizado al relave. Para este trabajo de título, el estudio se enfocará en el depósito *Tranque de Relaves*, ya que corresponde a la categoría que representa el Tranque El Torito.

##### 2.1.1.1. Tranque de Relaves

Depósito donde el muro es construido por la compactación de la fracción más gruesa del relave, en este caso las denominadas Arenas. Para la obtención de estas Arenas, se realiza una separación del relave a través de los Hidrociclones, maquinaria que separa sólidos gruesos de sólidos más finos, mediante impulsión por flujo de agua. Así, los granos gruesos, que corresponden a las Arenas, se utilizan para la construcción del muro de contención, mientras que la parte fina, denominada Lamas, se depositan en la cubeta del depósito. A continuación, en la Figura 2.1 se muestra la forma convencional para un Tranque de Relave de este tipo.

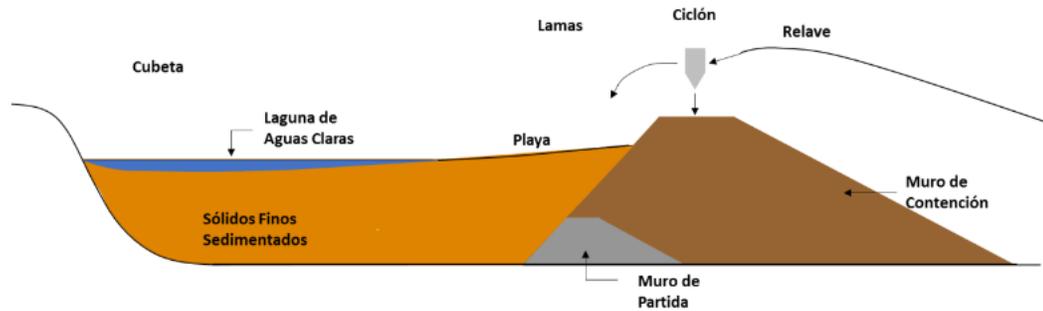


Figura 2.1: Esquema para un Tranque de Relaves.[6]

### 2.1.2. Tipos de construcción Tranque de Relaves

Los depósitos de relave se construyen mediante la elevación del muros de contención, durante la operación del depósito. Generalmente, se inicia con un pequeño muro que luego se eleva según la necesidad de la operación. Existen tres formas de elevar muros, pero desde 1970 en Chile, sólo se permiten dos tipos: Construcción Aguas Abajo y Construcción de Eje Central. El tercer método de Construcción Aguas Arriba se encuentra prohibido en el país.[8]

El método que ofrece mayor seguridad es el Método de Construcción Aguas Abajo, el cual consiste en depositar la parte gruesa del relave en el muro y en el coronamiento. Esto permite al muro crecer hacia abajo, donde cada etapa del muro se deposita sobre la etapa anterior. Acompañado de una adecuada compactación, este sistema ofrece mayor estabilidad física. Si bien este método es considerado más seguro, el método utilizado en el Tranque El Torito es el *Método de Construcción Eje Central*, el cual se considera un método mixto que sigue los principios del método Aguas Abajo y, a su vez, deposita arenas hacia el interior del muro[8]. A continuación, en la Figura 2.2 se presenta el esquema del método utilizado.

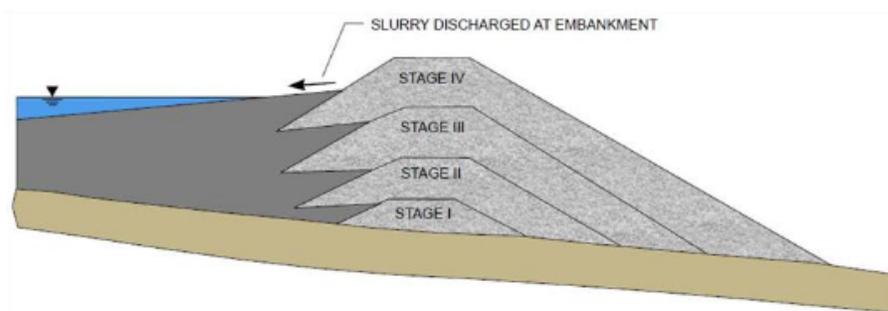


Figura 2.2: Esquema para Método de Construcción Eje Central.[6]

### 2.1.3. Partes de un Depósito de Relaves

Un depósito de relaves cuenta con distintas partes donde cada una cumple una función específica, esto basado en la clasificación realizada por el Sernageomin[8] y lo presentado por el Secreto Supremo[9]. A continuación se describen cada una de ellas.

- **Muro:** Estructura que permite contener los residuos sólidos que en ella se descargan. Corresponde a la zona periférica del depósito, estructurada artificialmente y completa el perímetro natural.
- **Cubeta:** Es el volumen físico delimitado por el muro y que está disponible para el depósito de relaves. Corresponde a la zona donde se acumularán los granos más finos del relave.
- **Laguna de Aguas Claras:** Es la laguna formada por el agua resultante de la sedimentación de las Lamas, partículas más finas obtenidas por los hidrociclones, en la cubeta.
- **Sistema de Drenaje:** Sistema utilizado para retirar el grado adecuado de agua del interior del muro, con el objetivo de deprimir al máximo el nivel freático en el interior del muro.
- **Revancha:** Es la diferencia menor, en cota, entre la línea de coronamiento del muro de contención y la superficie de la Laguna de Aguas Claras.
- **Coronamiento:** Parte superior del muro de contención, cercano a la horizontal.
- **Canal de contorno:** Canal de desvío de las aguas de la cuenca, que captan y desvían las escorrentías superficiales, impidiendo el ingreso a la cubeta del depósito de relaves.
- **Playa Activa:** Zona donde se descargan las lamas en la cubeta. Se denomina de esta manera ya que es una parte seca en la superficie y asemeja a una playa de arenas finas.

De estas zonas, los sistemas de Impulsión de Arena se enfocan en transportar y depositar la Arena al muro para su crecimiento. Para visualizar gráficamente estas secciones en un Tranque, se presenta el esquema de la Figura 2.3 a continuación:

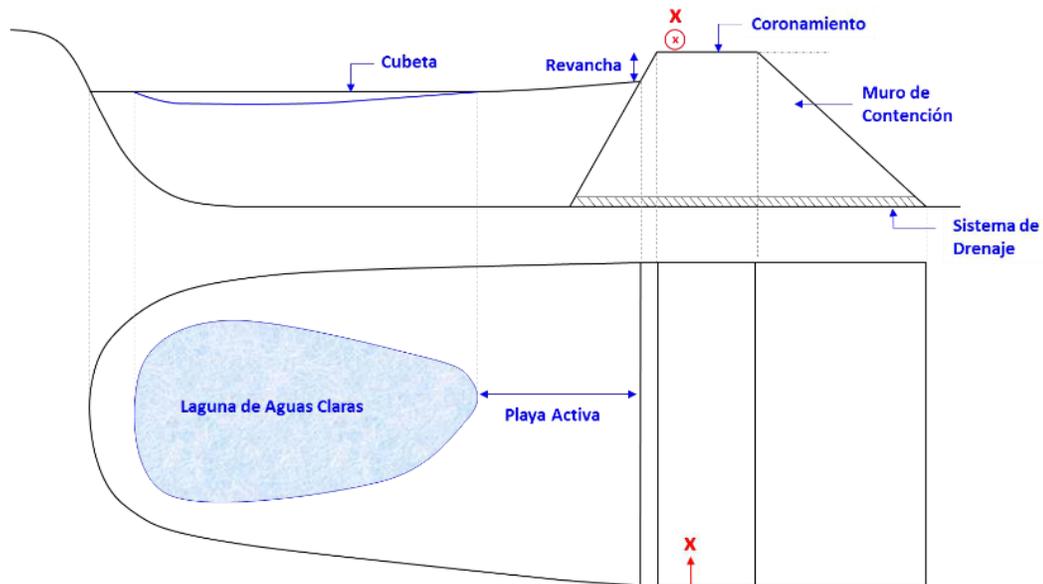


Figura 2.3: Esquema para un Tranque de Relaves.[6]

## 2.2. Tranque de Relaves El Torito - El Soldado

El Tranque de Relaves El Torito está localizado en la Quinta Región, Provincia de Quillota, Comuna de Nogales, a una distancia aproximada de 6 km de la Ruta 5 al noreste de la localidad El Melón. Este Tranque corresponde a un depósito de relaves que almacena y maneja los relaves de la mina El Soldado. Su método de construcción es de Aguas Abajo, descrito en la sección 2.1.2. Actualmente cuenta con aprobación para operar hasta una capacidad máxima de 235 Mt, de acuerdo con la Resolución de Clasificación Ambiental (RCA) N° 02/2020. Anualmente, el tranque recibe 7,08 Mt por año, provenientes desde la Planta Concentradora El Cobre y se espera que la capacidad máxima sea completada para el año 2027 bajo las condiciones de operaciones actuales.[10]

Los relaves son recibidos a través de un sistema de transporte y distribución, provenientes de la Estación Relevadora, estación que recibe el relave generado de la Flotación. Luego, los relaves son clasificados por Cicloneo, cuyo objetivo es producir Arenas para la construcción del muro, mientras que las Lamas se depositan en la cubeta del tranque. Las aguas generadas en el proceso, producto de la sedimentación de los relaves, son confinadas en un sector alejado del conocido como Laguna de Aguas Claras, para su posterior recuperación y recirculación dentro del proceso.[10]

Los principales procesos involucrados en el manejo de los relaves son:

- Crecimiento y operación del muro y muros de cola.
- Sistema de selección de relaves.
- Sistema de Transporte y distribución de relaves.
- Sistema de recuperación y recirculación de agua.

Para este trabajo, el desarrollo se enfocará en el proceso de Crecimiento y operación del muro y muros de cola, específicamente en el muro principal del Tranque El Torito. De los demás procesos, el crecimiento se relaciona con los sistemas de selección de relaves, transporte y distribución, ya que son etapas previas al crecimiento del muro. El sistema de recuperación y recirculación de agua no se ve involucrado directamente.

En la Figura 2.4, se presenta el área geográfica del Tranque El Torito, sector El Cobre.[10]



Figura 2.4: Área del Tranque de Relaves El Torito.

### 2.2.1. Crecimiento del Tranque

Como se ha dicho anteriormente, se proyecta alcanzar un almacenamiento total de relaves de 235 [Mt] para el año 2027[10]. Así, el crecimiento proyectado para estos años hasta el término se puede ver detallado en la Tabla 2.1 a continuación:

Tabla 2.1: Crecimiento Muro de Arena - Tranque El Torito.[10]

Año	Elevación Muro de Arena [m.s.n.m.]	Relave Acumulado [Mt]
Dic 2021	410,7	194
Dic 2022	412,6	202
Dic 2023	412,5	210
Dic 2024	416,2	218
Dic 2025	417,9	225
Dic 2026	419,6	233
Dic 2027	420,0	235

Es importante destacar que las arenas depositadas en el muro deben tener una concentración de peso entre 72 % y 73 %, pudiendo alcanzar un valor mínimo de 67 %. La descarga de arenas debe ser tal que forme una capa de espesor mínimo de 40[cm] sobre el talud aguas abajo del muro. Siempre verificar que no se produzca socavación en la descarga, si no puede causar no se quede con la compactación requerida.[10]



### 2.2.2.3. Sistema de selección, transporte y distribución de relaves

Desde la estación Relevadora se envía el relave que es recibido por el Cajón de Cabecera del Tranque. Desde este cajón, el relave tiene tres caminos: hacer una descarga directa del cajón hacia la Cubeta del Tranque, seguir al Cajón de Lamas y luego depositarse en la Cubeta del Tranque, o pasar a la estación de Ciclónaje para su clasificación y producción de Arenas para posteriormente ir al Muro del Tranque.

Tomando en cuenta este último camino, el relave es separado por los Ciclones en arenas finas y gruesas. El material fino se va al Estanque de Lamas y el material grueso sigue el proceso hasta el Cajón Repartidor. De este cajón, que su función es almacenar el material producido por los ciclones, las Arenas son conducidas gravitacionalmente hacia el Harnero Derripiador. Este Harnero tiene la función de filtrar el material para dejar pasar aquellos granos de arenas que tengan un diámetro igual o menor a 8 [mm].

Las arenas seleccionadas por este Harnero siguen bajando hasta ser depositadas en el Estanque Agitador. Este estanque mezcla la pulpa recibida con agua si es necesario. Esto dependerá del Sistema de impulsión de arena que este operando en el momento. Desde acá, el flujo es impulsado a través las líneas de distribución conformadas por tuberías de acero y HDPE hacia los 10 nudos ubicados en el coronamiento del muro, donde se llega a una tubería de acero de 6" de diámetro, con perforaciones tipo peineta para su posterior deposición en el muro.

El transporte de las arenas es ejecutado por tres distintos sistemas de Bombas de Impulsión de arenas existentes. El uso de cada uno dependerá del nudo final al que se debe llevar el material. Para los nudos 1 y 2 se realiza a través de bombas centrífugas de Rebose, correspondiente a las Bombas Curve con tuberías de HDPE de 6". Para los nudos desde el 3 al 10 hay dos opciones de transporte: La primera opción principal es la utilización de las bombas centrífugas ASH con tuberías de 8". La segunda opción es el uso de las bombas de desplazamiento positivo Abel, con tuberías de acero de 8". En el plano presentado en la Figura A.1, se detalla geográficamente la ubicación de los nudos de descarga.

## 2.3. Sistemas de Impulsión de Arenas

Como ya se ha nombrado y se muestra en la Figura 2.5, existen 3 sistemas de impulsión de arenas hacia el muro del tranque. Cada uno se diferencia por su principio de funcionamiento, parámetros de operación y nudo en donde debe depositar arenas.

Para seleccionar cuales de estos debe estar operando, dependerá de la planificación de depositación de arenas mensual del Tranque y de las condiciones del día, siendo flexible la operación en si seguir detalladamente la planificación o cambiar el nudo y sistema de bomba, quedando a criterio de los operadores día a día.

### 2.3.1. Sistema Ash

#### 2.3.1.1. Datos técnicos

El Sistema está compuesto por cuatro Bombas Ash 6x6" de sello hidráulico centrífugas proveídas por WEIR Minerals. La información técnica se detalla en las Tablas 2.2 y 2.3.

Tabla 2.2: Datos técnicos de Bomba Ash.

Información	Valor
Flujo [m <sup>3</sup> /h]	270
Concentración de sólidos por peso [%]	38
Temperatura [°C]	20
Velocidad motor [rpm]	1500
Potencia motor [kW]	110
Eficiencia bomba	72,9

Tabla 2.3: Materiales Bomba Ash

Materiales de la bomba	
Liner	Caucho R55
Impeller	Metal A05
Shaft	1045
Pump casing	Nodular 500 psi

A continuación, en la imagen de la Figura 2.6 se presenta fotos de las Bombas Ash.



Figura 2.6: Bombas Ash.

### 2.3.1.2. Funcionamiento

La descripción está basada en el Manual de Operaciones del Tranque El Torito [10].

Estas bombas trabajan en serie y su cantidad dependerá del nudo al cual deba impulsar arenas: Para el transporte desde el nudo 3 al nudo 6, se necesita utilizar dos bombas Ash en serie. Para el transporte desde el nudo 7 al nudo 10, se necesita utilizar 3 bombas Ash en serie. Así siempre habrá, al menos, una bomba disponible en Stand-By.

Por sus características, para utilizar estas bombas es necesario mezclar la pulpa de arenas resultante de la estación de cicloneo con agua, para transportarlas y descargarlas en los nudos del muro. Como al muro llega un material con más agua de la que se necesita, el uso de estas bombas implica realizar trabajos extras posterior a la descarga para lograr la compactación del muro y cumplir con los estándares de seguridad. Así, a continuación se detallan los trabajos necesarios posterior a la descarga de arena:

1. Una vez descargada la arena en el muro, el material se queda sobre este en forma de "Tortas", es decir, tipo bloques escalonados.
2. Para compactar estos bloques escalonados, es necesario la utilización adicional de Bulldozer CAT DR6 de 5 [ton] para mover las arenas y dejarlas sobre el muro listas para su posterior compactación. Finalmente se utiliza un rodillo vibratorio para la compactación del muro.

## 2.3.2. Sistema Abel

### 2.3.2.1. Datos técnicos

El Sistema Abel está compuesto por tres Bombas Abel HMQ de desplazamiento positivo proveídas por Tecfluid. La información técnica se detalla a continuación en las Tablas 2.4 y 2.5

Tabla 2.4: Datos técnicos de Bombas Abel.

Información	Valor
Flujo [m <sup>3</sup> /h]	180
Potencia motor [kW]	355
Velocidad motor [rpm]	1500
% de Sólidos [%]	74
Presión de descarga [Bar]	23
Presión de succión [Bar]	0,5
Tamaño partículas [mm]	8

Tabla 2.5: Materiales Bombas Abel.

Materiales de la bomba	
Cuerpo de bombeo	Fundición nodular
Cuerpo de válvulas	Fundición nodular
Tuberías succión y descarga	Acero al carbono
Diagfragmas	NBR
Válvulas cónicas	Acero /PU
Asientos	Acero endurecido
Camisa pistón	Acero endurecido con cromo
Reductor	Fundición
Engranajes	Acero endurecido con material certificado EN 10204-3.1
Crucetas	Fundición nodular
Eje del pistón	Acero inoxidable

A continuación, en las imágenes de las Figuras 2.7, 2.8 y 2.9 se presentan fotos de las Bombas Abel.

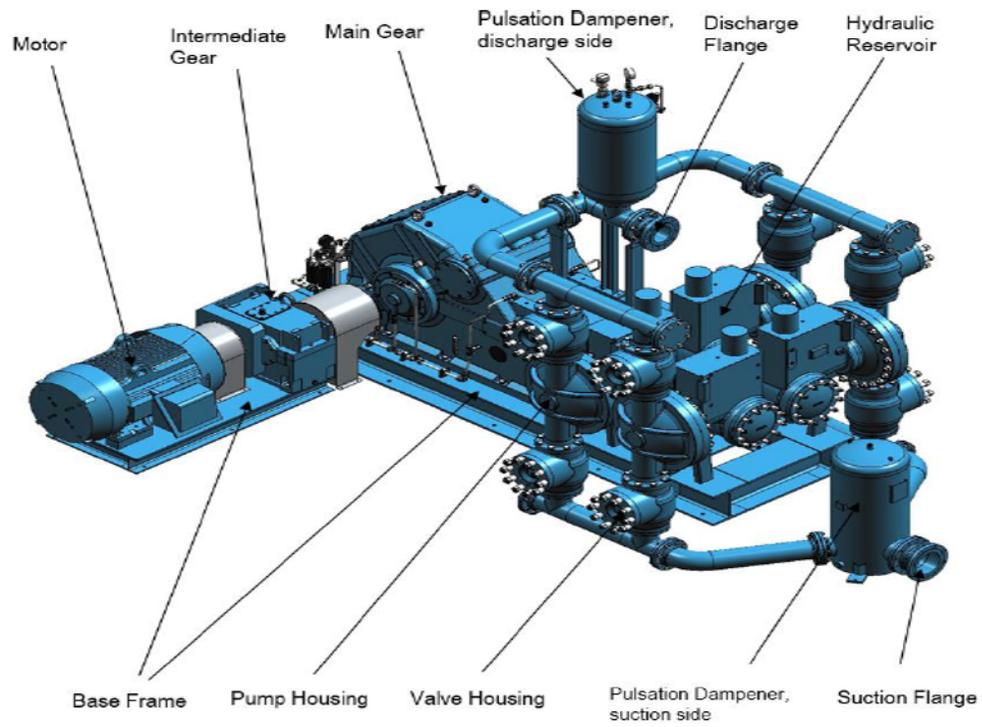


Figura 2.7: Prototipo Bomba Abel HMQ con partes especificadas.



Figura 2.8: Bomba Abel 3.



Figura 2.9: Bomba Abel 2.

### 2.3.2.2. Funcionamiento

La descripción está basada en el Manual de Operaciones del Tranque El Torito[10].

Este sistema comenzó sus pruebas de puesta en marcha en el año 2019 y funciona de la siguiente manera: Necesita una bomba de precarga, 2 bombas Abel en operación y 1 bomba Abel en Stand-by. Generalmente se utiliza una bomba ASH para precarga. De esta manera, se impulsa arenas desde el nudo 3 hasta el nudo 10 y término del muro. Por las características de estas bombas, utilizan menos agua en el flujo que deben transportar en comparación al Sistema Abel. Además, al momento de depositar el material en el muro, este queda listo para su compactación, si la necesidad de utilizar Bulldozer para remover las arenas.

Sin embargo, este sistema se instaló con el fin de convertirse en las bombas principales para la impulsión y descarga de arenas sobre el muro. Pero actualmente no presentan una operación continua y por lo mismo, no se ha logrado potenciar para cumplir con este fin. Los motivos de esto es que a lo largo de su funcionamiento ha presentado diversos problemas, tanto de origen operacional como fallas mecánicas de la bomba.

Además, por los problemas mecánicos que se presentan y la dificultad de conseguir los repuestos necesarios, actualmente la Bomba 3 se encuentra fuera de operación, ya que esta se ha utilizado de repuestos para las otras dos bombas. Esto se visualiza en la Figura 2.8.

### 2.3.3. Sistema Curve

Este sistema opera desde el año 2019 funciona como: 1 bomba Curve en operación y 1 bomba Curve en Stand-by. Con una bomba en funcionamiento es suficiente para impulsar las arenas hasta los nudos 1 y 2 del Tranque. Los parámetros de operación de este sistema se encuentran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6: Parámetros de operación mensuales.  
Fuente: Elaboración propia.

Parámetros Bombas Curve		
Parámetro	Diseño	Real
Flujo [m <sup>3</sup> /h]	50-100	99
Horas de operación mensual [hrs]	-	90
Tonelaje mensual [kton]	-	20

A continuación en la Figura 2.10 se muestran las Bombas Curve en terreno.



Figura 2.10: Bombas Curve.

## 2.4. Indicadores operacionales

Para caracterizar el estado operacional y analizar el rendimiento de los equipos, los indicadores se enfocarán en los siguientes parámetros, que a su vez son los pedidos por Anglo American:

- **Horas de operación:** Se consideran las horas de todos aquellos momentos en que los sistemas estuvieron funcionando de manera normal.
- **Horas detenidas:** Se consideran todas las horas que sean por causas de: fallas, mantenimientos programadas, fallas aguas arribas del Tranque y espacios horarios de detención pero que no hay información.
- **Arenas depositadas:** Se considera la cantidad de arenas transportadas y depositadas por cada sistema. Se mide en Kilotoneladas [kton].
- **Flujo:** Es el Flujo transportado por cada sistema hacia el muro. Se mide en metros cúbicos por hora [ $\text{m}^3/\text{h}$ ].
- **Tasa arenas:** Es la cantidad de arenas por hora que mueven los sistemas de arenas por separado, midiéndose en [kton/h].

A fin de obtener el cálculo de estos parámetros para cada sistema de impulsión de arena, Anglo American entregará la información necesaria para su obtención. Además, solo se presentarán los resultados para el año 2021, así los valores podrán relacionarse con los costos asociados en la sección 4.5 de Evaluación económica. Sumado a esto, los cálculos solo se enfocarán en las Bombas Ash y Abel, ya que son el centro de estudio de este trabajo.

Y de acuerdo a esto, para visualizar los indicadores descritos se utilizarán distintos tipos de gráficos dependiendo de los datos. Para ello se tienen Histogramas, gráficos de tortas y gráficos de líneas.

## 2.5. Indicadores de mantenimiento

Con el objetivo de caracterizar y analizar el estado de mantenimiento con la información disponible, se obtendrá lo siguiente: Análisis de Pareto, cálculo de MTBF y MTTR, esto para cada sistema. El periodo de tiempo a utilizar para este cálculo será toda la información disponible en los registros que hay para las bombas. Además, este cálculo solo se enfocará en las Bombas Ash y Abel, ya que son el foco de estudio de este trabajo.

### 2.5.1. Análisis de Pareto

Es las herramientas de Gestión de Activos utilizada para jerarquización de los elementos estudiados. Así, busca con dar priorización a las principales causales de algún evento, tornándose estas en elementos críticos a tratar.[11]

Es una herramienta de análisis gráfico que sirve para evaluar: modos y tipos de falla, tipos de equipos, piezas involucradas, entre otros. Se basa en la regla del 80-20, es decir, que el 80 % de los defectos son producidos por el 20 % de las causas.[11] A continuación, en la Figura 4.2.1.1 se presenta un ejemplo de Gráfico de Pareto.

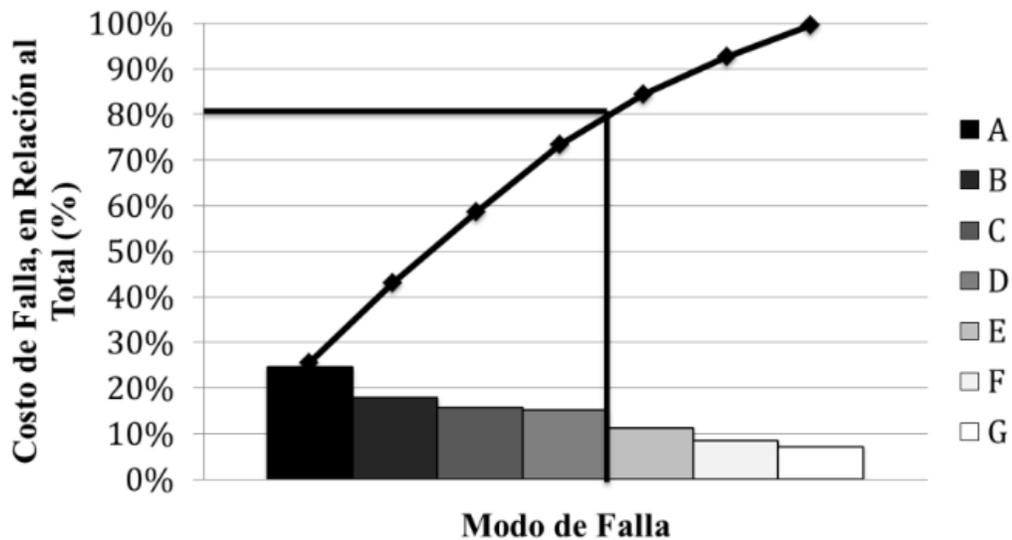


Figura 2.11: Ejemplo Gráfico de Pareto.[11]

Así, el ejemplo del Diagrama de Pareto presentado se analiza como: De acuerdo a la regla, el 80% de los defectos, para este caso el 80% del costo de falla, es causado por los cuatro modos de falla con mayor repercusión A, B, C y D. Por lo tanto se debe priorizar la disminución de estos modos de falla.

Si bien es una herramienta de fácil acceso y aplicación, la desventaja que posee es que al presentarse varios causantes, para este caso detenciones, se dificulta encontrar cual factor es el que tiene mayor impacto negativo en el sistema. Así, el análisis de Pareto pierde validez cuando se presentan muchas detenciones y no están clasificadas por la causa real de cada detención.[11]

## 2.5.2. Mean Time to Repair [MTTR]

En Español, el Tiempo medio de reparación es el tiempo medio necesario para reparar un sistema y restablecer su funcionalidad completa. Para el cálculo del MTTR, el tiempo comienza una vez que se inicia una reparación y continúa hasta que los servicios interrumpidos se restauran por completo, incluido el tiempo de prueba necesario.[12]

Dado que el MTTR es una métrica de Gestión de Incidentes, se debe apuntar a mantener su número lo más bajo posible. Esto puede lograrse mejorando los procesos de reparación de las fallas presentadas.[13]

A continuación la ecuación 2.1 indica como calcular el MTTR[13]:

$$MTTR = \frac{T_{iempo_R}}{N_{úmero_R}} \quad (2.1)$$

Donde:

- **Tiempo<sub>R</sub>**: Es el tiempo total dedicado a reparaciones en un periodo de tiempo determinado. Se mide en horas [h].
- **Número<sub>R</sub>**: Es la cantidad total de reparaciones realizadas en un periodo de tiempo determinado igual al T<sub>R</sub>. No tiene unidad de medidas.

### 2.5.3. Mean Time Between Failure [MTBF]

En Español, el Tiempo medio entre fallas es el tiempo transcurrido entre una falla y la siguiente. Dado que MTBF se usa para rastrear la confiabilidad, solo refleja cortes inesperados y no toma en cuenta ningún tiempo de inactividad probable durante el mantenimiento planificado.[12] Así es posible idear que tan efectivo es el equipo para prevenir incidentes no deseados. Además, esta métrica solo se utiliza para rastrear fallas en sistemas reparables.[13]

A continuación la ecuación 2.2 indica como calcular el MTBF:

$$MTBF = \frac{T_{iempo_O}}{N_{úmero_F}} \quad (2.2)$$

Donde:

- **Tiempo<sub>O</sub>**: Es el tiempo total operativo entre fallas para un periodo determinado. Se mide en horas [h].
- **Número<sub>F</sub>**: Es la cantidad total de fallas ocurridas en un periodo determinado igual a Tiempo<sub>O</sub>. No tiene unidades de medida.

## 2.6. Detector de anomalías

De forma paralela a la evaluación y análisis convencionales del estado de operación y mantenimiento definido en las secciones 2.4 y 2.5, se propone la realización de un Detector de Anomalías con el fin de dar uso a información disponible en Anglo American y dar cuenta nuevas tecnologías disponibles para el procesamiento y análisis de datos disponibles de monitoreo y operación.

Para dar contexto al desarrollo de esta herramienta, es importante diferenciar el Machine Learning y Deep Learning. El *machine learning* es la ciencia de programar computadores para que aprendan a través de datos en lugar de aprender mediante la programación explícita[14].

Basa su trabajo en la utilización de distintos algoritmos existentes. los cuales dependerán del uso que se le quiera dar. Así, conforme el algoritmo se entrena con los datos disponibles, es posible producir modelos precisos basados en esta información. Por ejemplo, un algoritmo predictivo creará un modelo predictivo. Luego, cuando se proporcione el modelo con datos, el resultado será un pronóstico basado en la información que entrenó al modelo.[16]

Así, las técnicas del *machine learning* son necesarias para mejorar la predicción de los modelos. Existen distintas categorías basadas en el tipo y volumen de datos. Dentro de estas categorías se encuentra el *Deep Learning*, el cual se entiende como un método específico del machine learning que incorpora redes neuronales en capas sucesivas para aprender de los datos de manera iterativa. Estas redes neuronales están diseñadas para emular el funcionamiento del cerebro humano, por lo que son útiles para aprender patrones de datos no estructurados.[16]

De esta manera, es posible aplicar los modelos y tecnologías a las áreas de mantenimiento y gestión de activos físicos en la industria, ya que ayudan a comprender los cambios sutiles en el comportamiento difíciles de captar para un ser humano[16]. Así, los modelos basados en datos para los marcos de pronóstico y gestión de la salud en activos físicos tienen el objetivo de mejorar las opciones disponibles en la toma de decisiones para optimizar las políticas de confiabilidad, rendimiento y mantenimiento para los sistemas y sus componentes, esperando que reduzcan tiempos de inactividad y costos, aumentando simultáneamente la disponibilidad general del sistema.[17]

Todo esto se logra a través del Detector de Anomalías, que consiste en la aplicación de técnicas de deep learning para detectar y advertir de un mal funcionamiento/evento con una anterioridad previamente definida. El desarrollo de esta herramienta consta de dos etapas: el Preprocesamiento y el Modelo, las cuales se verán en las siguientes secciones.

### **2.6.1. Preprocesamiento**

La etapa de Preprocesamiento de datos es un paso esencial en los marcos de pronóstico y gestión de la salud de los activos. Esta se encarga de realizar una limpieza y preparación de los datos obtenidos de sensores, data que generalmente contienen errores, inconsistencias, falta de información o mala calidad de los datos que al usarlos como tal, pueden generar modelos de pronóstico con un rendimiento deficiente afectando el proceso de toma de decisiones. Por lo tanto, este procesamiento de datos de monitoreo en sistemas reales facilita su posterior implementación en modelos de diagnóstico o pronóstico a nivel industrial.

Para el desarrollo de esta etapa, se seguirá la metodología presentada en el paper *Big Machinery Data Preprocessing Methodology for Data-Driven Models in Prognostics and Health Management*[17].

El procesamiento de datos implica varios pasos antes de entrenar un modelo, los cuales dependerán de los datos disponibles y el modelo seleccionado. El preprocesamiento propuesto consiste de cuatro etapas: Selección de características, análisis estadístico, preparación del conjunto de datos y generación de etiquetas de estado de salud. A continuación se detalla cada etapa y los pasos seguidos en cada una de ellas.

1. **Selección de características:** Consiste en seleccionar y reducir las características irrelevantes. Esto se realiza a través del conocimiento expertos de los ingenieros de campo y descartando las variables que presenten un alto porcentaje de números faltantes o que no se relacionen con la física de degradación del sistema.
2. **Análisis estadístico:** Consiste en una segunda etapa para reducir aun más la cantidad del conjunto de datos y eliminar las redundancias con las herramientas del análisis estadístico. Este etapa no se utilizará en el desarrollo de esta memoria.
3. **Preparación conjunto de datos:** Para continuar con el procesamiento de los datos, se tienen las siguientes etapas a seguir. Primero, luego de la reducción de características, aun es posible encontrar valores no numéricos restantes en el conjunto de datos. Si los valores representan un pequeño porcentaje de los datos, estas filas se pueden descartar. En segundo lugar, es posible que se necesite una mayor reducción en la dimensionalidad. Para ello se realiza un Análisis de Componentes Principales (PCA), el cual se describe en la sección 2.6.1.1.
4. **Generación de etiquetas de estado de salud:** La mayoría de las aplicaciones de los modelos basado en datos para pronóstico y gestión de la salud de los activos tienen cierto grado de aprendizaje supervisado, por lo que requieren etiquetas precisas para el proceso de entrenamiento de los modelos. En primer lugar, es importante comenzar con el análisis y selección del modo de falla. Para ello, se debe generar un conjunto de datos de clasificación con etiquetas de estado de salud y modos de falla, el cual se obtendrá del registro de mantenimiento.

En segundo lugar, una vez identificado los modos de falla y el estado de salud en cada momento, se deben crear ventanas de tiempo para que el modelo pueda identificar un estado degradado antes de un evento de falla como tal. Esto se genera bajo el supuesto que, al momento de falla en un sistema, este presenta una transición desde el estado saludable al estado degradado y no como un evento puntual que ocurre de una lectura del sensor a otro.

La metodología presentada en este apartado está diseñada para generar conjuntos de datos representativos y confiables en el contexto de los marcos de pronóstico y gestión de salud de activos.

### 2.6.1.1. Análisis de Componentes Principales [PCA]

La herramienta de PCA es un algoritmo de reducción de dimensionalidad. En primer lugar, identifica el hiperplano que queda más cerca de los datos y, a continuación, proyecta en él los datos, procurando maximizar la varianza de los datos ya que, de esta manera, lo más probable es que pierda la menor cantidad de información posible. El eje identificado como el que presenta la mayor variabilidad, es denominado 1º componente principal. El segundo eje con mayor variabilidad, después del primero, es denominado 2º componente principal, y así sucesivamente. En la Figura 2.12 se ejemplifica el funcionamiento de este algoritmo para preservar la mayor variabilidad[14].

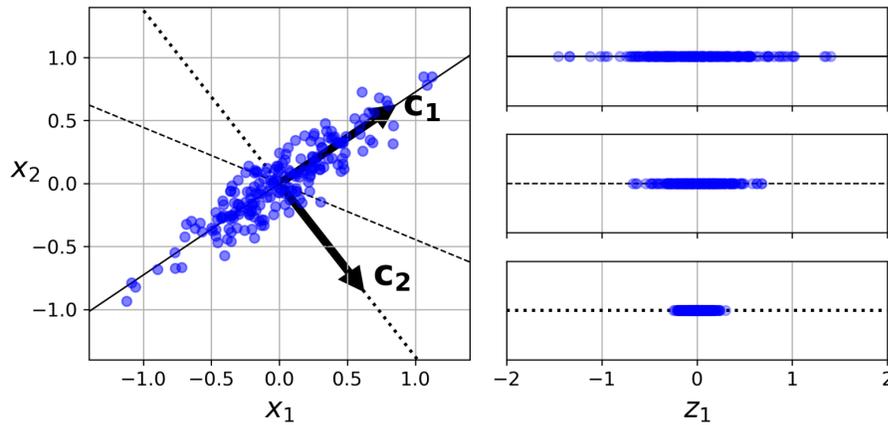


Figura 2.12: Selección de componentes principales del algoritmo PCA[14].

Una vez calculado los componentes principales, se debe escoger la cantidad de dimensiones que se utilizarán en el modelo. Para esto, la regla será siempre seleccionar el número de dimensiones que sume la mayor cantidad de varianza acumulada. Para este problema, se utilizará un mínimo del 80% de la varianza acumulada para el PCA. Esto se realizará mediante el gráfico de varianza acumulada, como el que se muestra a continuación en la Figura 2.13[14].

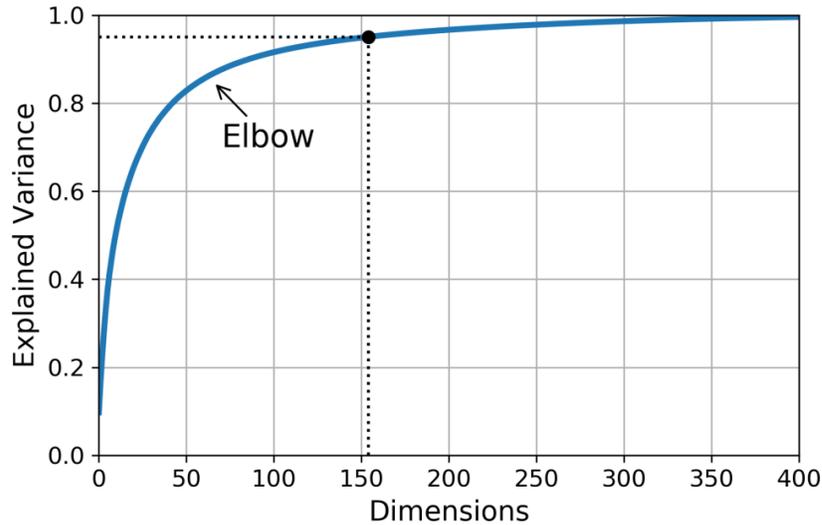


Figura 2.13: Gráfico acumulación de varianza para PCA[14].

## 2.6.2. Modelos

Desde el Preprocesamiento se obtienen los datos listos para ser utilizados en modelos de Deeplearning. Estos se harán con dos objetivos: diagnosticar y pronosticar la condición del activo. Su estructura e hiperparámetros de los modelos se estudiarán en esta sección.

En cuanto al *Diagnóstico*, este se entiende como modelos que buscan identificar la condición actual del activo detectando patrones de funcionamiento en base a los parámetros operacionales.

Para el *Pronóstico*, este se basa en el mismo principio que el diagnóstico, sin embargo este busca anticiparse en el tiempo, es decir, predecir la condición futura del activo en un horizonte de tiempo a definir.

### 2.6.2.1. Autoencoder

Es una estructura que utiliza redes neuronales con el objetivo de aprender una representación (codificación), comprimirla y distribuirla en un conjunto de datos. Es decir, esta red está capacitada para recrear la entrada. A continuación, en la Figura 2.14 se presenta un ejemplo de como es la arquitectura propuesta por los Autoencoder[15].

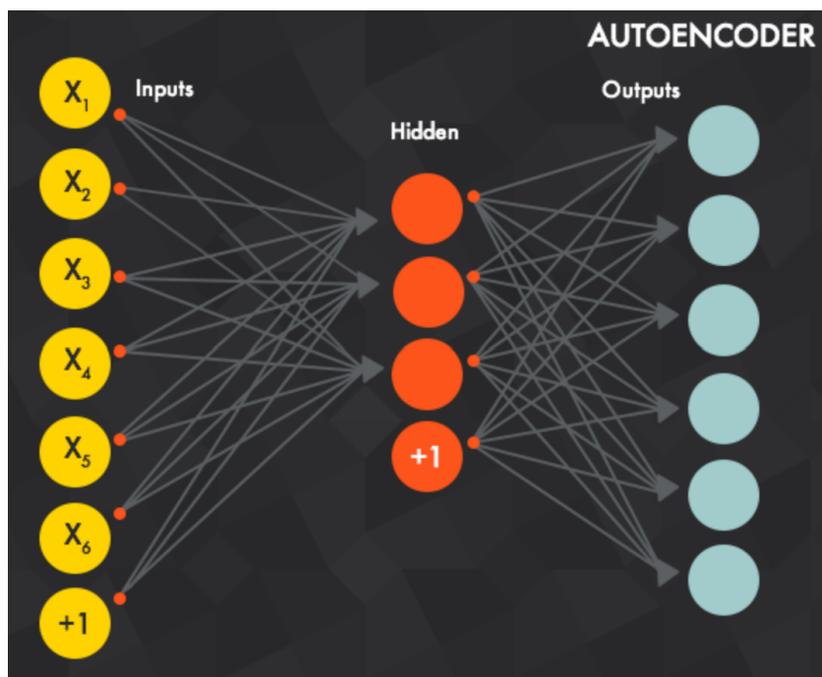


Figura 2.14: Ejemplo de arquitectura propuesta por Autoencoder.[15].

De manera simple, esta estructura comprime inicialmente con el Encoder los datos de entrada durante el paso de las capas definidas para esto. Luego llega al centro con la información lo más compactada posible, para finalmente pasar al Decoder que realiza el proceso inverso y reconstruye la entrada a partir de la información compactada[15].

### 2.6.2.2. Redes neuronales recurrentes convencionales [RNN]

Las Redes Neuronales Simples son propuestas por David Rumelhart en 1986. Su estructura se basa en extraer características mediante capas secuenciales sucesivas. A estas neuronas se les asigna ventanas de tiempo específicas para procesar la información, por lo cual cada secuencia mantiene un registro de información de la secuencia anterior.

La forma de adquirir información de este tipo de neuronas, que hace que estén todas conectadas, otorgan las siguientes ventajas: Una mayor adaptabilidad ante datos incompletos ya que su rendimiento no se ve afectado por valores perdidos, una mayor memoria a corto plazo lo cual es positivo para realizar pronóstico de respuestas en breves series temporales y finalmente mayor capacidad de extracción de características ya que colocan mayor atención a los últimos datos de entrada pudiendo obtener características más complejas del contenido.

Como esta red neuronal trabaja de forma secuencial y con ventanas de tiempo, provoca que tome más tiempo las etapas de entrenamiento y procesamiento, lo que es computacionalmente más costoso.

### 2.6.2.3. Redes LSTM

Las Long Short-Term Memory (LSTM), o redes neuronales de memoria larga corto plazo, son propuestas en 1997 por Sepp Hochreiter y Jurgen Schmidhuber y donde su estructura le otorga una extensión de la memoria a largo plazo sobre los datos de entrada, mitigando el olvido de las características extraídas de los primeros datos de la información de entrada[18]. Por esto, su rendimiento es más favorable a que el entrenamiento convergerá más rápido y será capaz de detectar dependencias a largo plazo en los datos[14].

### Ventajas de las LSTM

Debido a la arquitectura de estas redes neuronales que poseen dos tipos de componentes de memoria, poseen una mayor capacidad para retener en su memoria las características extraídas de la información de entrada, otorgándoles facilidad para recordar secuencias más largas y complejas, siendo capaces de modelar dependencias de secuencias a largo plazo[18].

Es por este motivo que se selecciona este tipo de redes neuronales, para no perder información inicial de los datos al momento del pronóstico.

### 2.6.2.4. Función de activación

Las funciones de activación son importantes al momento del entrenamiento de las redes neuronales profundas, debido a que introducen una no linealidad en el cálculo de la función de entrada. Esto permite realizar transformaciones complejas de los datos, aumentando la capacidad de representación de cada una de las neuronas de la red[19].

Existen diversas funciones de activación que se pueden utilizar. Para el desarrollo de este trabajo, se usarán las funciones Tangente hiperbólica (*tangh*) y la función de Unidad lineal rectificadora (ReLU).

### Tangente hiperbólica [*tangh*]

Esta función tiene forma de S, es continua y diferenciable, pero su valor de salida oscila entre -1 y 1. Este rango tiende a hacer que la salida de cada capa de la red neuronal esté más o menos centrada en 0 al principio del entrenamiento, lo cual suele ayudar a acelerar la convergencia del entrenamiento[14]. Esta función se puede escribir de la siguiente manera:

$$\tanh(z) = 2\phi(2z) - 1 = \frac{e^z - e^{-z}}{e^z + e^{-z}} \quad (2.3)$$

La representación de esta ecuación puede verse en la siguiente Figura 2.15[14]:

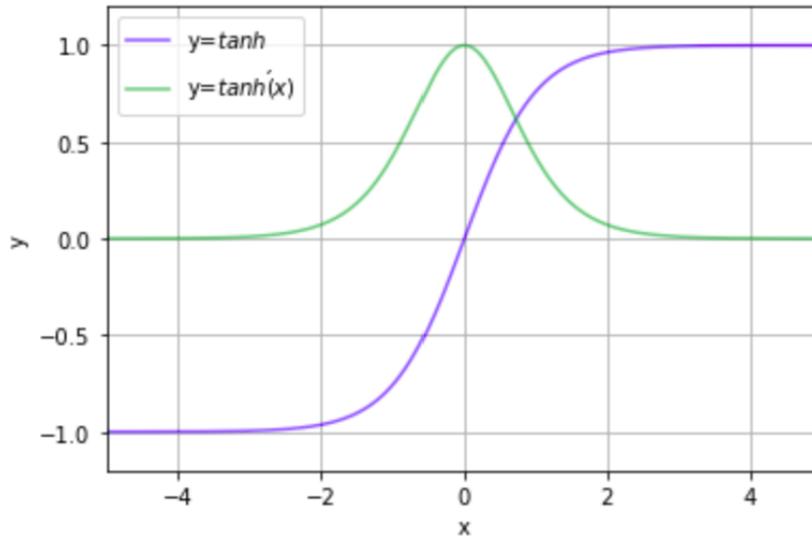


Figura 2.15: Función Tanh y su derivada[19].

### Unidad lineal rectificada [ReLU]

Esta función es continua, pero no diferenciable en  $z = 0$  y su derivada es 0 para  $z < 0$ . Sin embargo, en la práctica funciona bien y es rápida de calcular[14]. Es por esto que es más fácil de implementar computacionalmente ya que la función que la define es más simple matemáticamente que la función tanh[19]. Con esto, la función ReLU se define como[14]:

$$ReLU(z) = \max(0, z) \tag{2.4}$$

La representación de esta ecuación puede verse en la siguiente Figura 2.16:

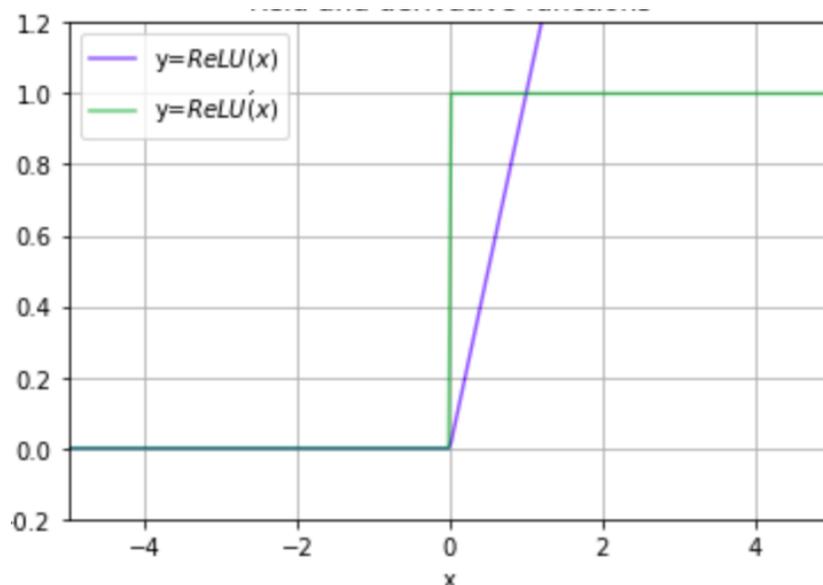


Figura 2.16: Función ReLU y su derivada[19].

### 2.6.2.5. Curva ROC

Para evaluar el rendimiento del Detector de Anomalías, en primer lugar se define la curva ROC (receiver operating characteristic) en Español, Característica Operativa del Receptor, la cual es similar a la curva de precisión/sensibilidad con la diferencia que la curva ROC traza la tasa de verdaderos positivos (TPR) frente a la tasa de falsos positivos (FPR). El TPR mide hasta qué punto un clasificador es capaz de detectar los casos positivos correctamente dentro de todos los casos positivos disponibles en la data. El FPR define cuantos resultados positivos son incorrectos de entre todos los casos negativos disponibles en la data. Un buen clasificador mantiene la curva ROC hacia la esquina superior izquierda, lo más lejos posible del centro del gráfico[14]. Una representación de esta curva se aprecia en la Figura 2.17.

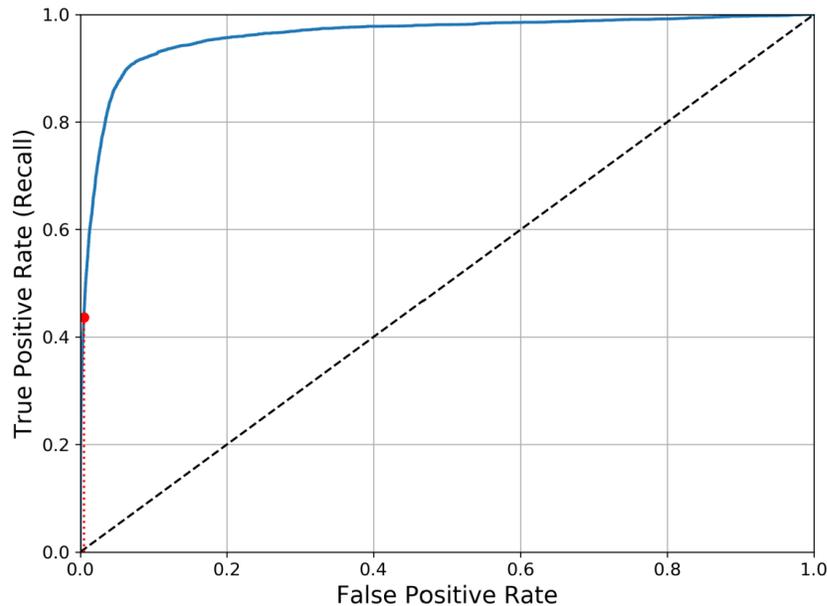


Figura 2.17: Curva ROC[14].

Este ejemplo muestra una buena predicción en base a la forma de la curva ROC, ya que el caso ideal de de clasificación perfecta ocurre en la coordenada (0,1) del espacio, el cual presenta un 100 % de ningún falso positivo y un 100 % de ningún falso negativo.

La diagonal divide el espacio ROC, así los puntos por encima de esta curva representan buenos resultados de clasificación y los puntos por debajo de la línea, los malos resultados.

Para interpretar esta curva se utilizará el parámetro *AUC* (area under the curve). Un clasificador perfecto tendría un AUC igual a 1, mientras que un clasificador aleatorio tendría un AUC igual a 0,5, equivalente a la diagonal presente en el gráfico de la Figura 2.17.[14]

Si se posee un  $AUC = 0,8$  significa que existe una probabilidad del 80 % de que el diagnóstico realizado sea el correcto.

### 2.6.2.6. Matriz de confusión

Otra medida para evaluar el rendimiento de los modelos es la Matriz de Confusión. La idea de esta matriz es contar el número de veces que las instancias de una Clase A se clasifican como Clase B. Cada fila de una matriz de confusión representa una clase real, mientras que cada columna representa una clase predicha. Un clasificador perfecto tendría solo verdaderos positivos y verdaderos negativos, lo cual se ve representado en la matriz con valores distintos de cero solo en su diagonal. Un ejemplo de esto puede verse en la Figura 2.18.



Figura 2.18: Ejemplo Matriz de Confusión para clasificador perfecto[21].

Para evaluar cuantitativamente el rendimiento de la Matriz de Confusión, se tendrán las siguientes métricas: Exactitud, Precisión y Sensibilidad.

La *Precisión* es la exactitud de predicciones positivas[14], o se puede entender como la capacidad de un modelo para evitar que las etiquetas negativas se etiqueten como positivas[21].

La precisión suele utilizarse junto a otra métrica, la *Sensibilidad*, que es el ratio de instancias positivas que el clasificador detecta de manera correcta[14].

Es conveniente combinar la Precisión con la Sensibilidad en una sola métrica llamada  $F_1$ . Este representa la media armónica entre precisión y sensibilidad, lo cual significa que da mucho más peso a los valores bajos. Como resultado, el clasificador obtendrá un valor  $F_1$  si tanto la sensibilidad como la precisión son altas[14].

## 2.7. Evaluación económica

En los proyectos de ingeniería es necesario definir indicadores para la evaluación de su desempeño económico, con tal de tomar decisiones en base a indicadores cuantitativos.

Para cumplir con esto, se divide esta información en dos partes: En primera instancia se define el costo de depositar 1 kilotonelada de arena en el muro y el costo de 1 hora de

detención, tanto operacional como detención mecánica. De esta manera es posible caracterizar el gasto anual del año 2021. Luego en el análisis se utilizará la información entregada por balance del gasto anual para el Tranque El Torito, año 2021. En segundo lugar se definen los indicadores económicos que se utilizarán para la evaluación del proyecto de inversión, tomando como base la mejoras técnicas propuesta en la sección 4.4.

Debido a que en esta sección se presentarán los costos de las mejoras técnicas requeridas por Anglo American, lo que se considera información reservada de la empresa, cada uno de los valores se presentarán en la moneda creada para este informe: las *CoppCoin*, donde su unidad de medida será *CC*. Así, se comienza por definir los indicadores para el costo de operación de las bombas.

### 2.7.1. Costo de kilotonelada de arena

El costo se define como el valor en *CoppCoin* por el transporte y depositación de 1 kilotonelada de arena para cada sistema. Este costo toma en cuenta todo lo gastado en el funcionamiento, operación y mantenimiento de la bombas. Se obtiene de la siguiente forma:

$$C_A = \frac{C_t}{A_t} \quad (2.5)$$

Donde:

- **C<sub>A</sub>**: Es el costo por kilotonelada de arena transportada y depositada en el muro. Se mide en [CC/kton].
- **C<sub>t</sub>**: Es el costo total del año 2021 para el sistema de bombas en estudio. Se mide en [CC].
- **A<sub>t</sub>**: Es la arena total depositada durante el año 2021 para el sistema de bombas en estudios. Se mide en [kton].

### 2.7.2. Costo por día de trabajo

Es el costo que se define como el valor en *CoppCoin* por 1 día de trabajo para el sistema en estudio. Considera todo lo gastado en operación y mantenimiento junto. Se obtiene de la siguiente forma:

$$C_d = \frac{C_t}{365} \quad (2.6)$$

Donde:

- **C<sub>d</sub>**: Es el costo promedio por día de trabajo. Se mide en [CC].

### 2.7.3. Costo mensual de funcionamiento

El costo se define como el valor en *CoppCoin* por el trabajo de operación y mantenimiento por separado, por mes de funcionamiento. Así, el costo de operación considera mano de obra, energía y servicios de mantención, y el costo de mantenimiento considera servicios, repuestos, mano de obra asociada a mantenimiento y materiales. A continuación se detalla la ecuación utilizada para cada una:

$$C_{op} = \frac{C_o}{12} \quad (2.7)$$

- $C_{op}$ : Es el costo de operación por mes de trabajo. Se mide en [CC].
- $C_o$ : Es el costo de operación total del año 2021. Se mide en [CC].

$$C_{mtto} = \frac{C_m}{12} \quad (2.8)$$

- $C_{mtto}$ : Es el costo de mantenimiento por mes de trabajo. Se mide en [CC].
- $C_m$ : Es el costo de mantenimiento total del año 2021. Se mide en [CC].

### 2.7.4. Desglose costo por kilotonelada

Una vez identificada la proporción de costos de mantenimiento y costos de operación de los sistemas en estudio, se obtiene la proporción de estos en 1 kilotonelada de arena depositada. De esta manera se logra identificar que es en lo que más se gasta en el transporte y descarga de arenas.

$$\left(\frac{C_{mtto}}{C_t} \cdot 100\right) \cdot C_A + \left(\frac{C_{op}}{C_t} \cdot 100\right) \cdot C_A \quad (2.9)$$

Donde la primera parte de la expresión corresponde a el costo de mantenimiento para trasladar y depositar 1 kilotonelada de arena, mientras que la segunda parte de la expresión es el costo de operación para 1 kilotonelada de arena.

A continuación se definen los indicadores económicos a utilizar para la evaluación del proyecto de inversión[20]:

### 2.7.5. Periodo de retorno de la inversión [PRI]

Este indicador calcula el tiempo en que el proyecto tarda en recuperar la inversión según la ecuación 2.10.

$$PRI = \frac{I_i}{A_i} \quad (2.10)$$

Donde:

- **I<sub>i</sub>**: Representa el costo de inversión de la propuesta en estudio.
- **A<sub>i</sub>**: Representa el ahorro proyectado de la propuesta en estudio.

### 2.7.6. Valor actual neto [VAN]

Este indicador corresponde a la suma de los flujos de efectivo del proyecto para un tiempo cero. Para un proyecto en el que se están evaluando N periodos, el VAN se calcula según la ecuación 2.11.

$$VAN_i = -I_i + \sum_{j=0}^N \frac{F_j}{(1+r)^j} \quad (2.11)$$

Donde:

- **F**: Representa el flujo del proyecto en el periodo *j*.
- **r**: Representa la tasa de descuento del proyecto, la cual aumenta en función del riesgo financiero y representa el valor del dinero en el tiempo.

Un proyecto que retorne flujos de efectivo posee un VAN mayor a cero.

### 2.7.7. Tasa interna de retorno [TIR]

Este indicador se define como la tasa de interés a la que el proyecto posee VAN igual a cero. Luego, la TIR se puede calcular igualando a cero la ecuación 2.12, lo que resulta como:

$$0 = -I_i + \sum_{j=0}^N \frac{F_j}{(1+r)^j} \quad (2.12)$$

Otra interpretación que se puede realizar a la TIR para su comprensión es que es un porcentaje que mide la viabilidad de un proyecto o empresa, determinando la rentabilidad de los cobros y pago actualizados generados por una inversión.

# Capítulo 3

## Metodología

Para cumplir con los objetivos principales y secundarios de este trabajo de título, es necesario describir y definir una ruta de actividades y forma de trabajo que permitirán desarrollar de manera adecuada la realización de este informe. Cabe destacar que este trabajo tiene una modalidad mixta: Algunos días con teletrabajo y otros días con trabajo presencial en El Soldado.

### 3.1. Recopilación de información

Se define esta etapa preliminar de recopilación de información, ya que es necesario, para desarrollar los objetivos de la memoria, generar bases de datos provenientes de la información disponible en Anglo American. Se divide en dos fases:

#### 3.1.1. Levantamiento de detenciones y fallas

Corresponde a una generación de base de datos en relación a las fallas y detenciones de los sistemas de Bombas Abel y Bombas Ash. Para esto, se utilizan, como recurso, los informes operacionales *Reportes Diarios Mensuales* elaborados por operadores en el Tranque de Relaves El Torito.

De estos *Reportes Diarios Mensuales*, se extrae la información sobre detenciones y fallas que se encontrasen en lo comentado durante el turno. Para clasificar estas detenciones, se definen tres grandes tópicos: *Tipo detención* y *Sub Tipo detención*. Así, el primero corresponde a la clasificación general y el segundo a la clasificación de los modos de falla para cada *Tipo detención*. El criterio para clasificar la información de Tipo detención es la siguiente:

- **Detención operacional:** Son todas aquellas fallas o detenciones que tengan relación con equipos aguas arriba o aguas abajo del sistema de bombeo. Estos incidentes son externos y no tienen relación directa con el funcionamiento de los sistemas de bombeo pero sí causan una detención de los equipos.
- **Detención MP:** Son todas aquellas detenciones que tienen directa relación a manteni-

mientos planificados de los sistemas de bombeo.

- **Detenciones MNP:** Son todas aquellas fallas o detenciones imprevistas que tengan relación directa con los equipos de los Sistemas de Bombeo.
- **Detención indefinida:** Son todas aquellas detenciones que se sabe que ocurrieron y afectaron el funcionamiento de los sistemas de bombeo, pero no se tiene información sobre lo que ocurrió durante la operación.
- **Sin información:** Son días en los que no hubo registro de información durante los turnos.

Luego, a los modos de falla pertenecientes al criterio *Detenciones MNP* se les realiza otro tipo de categorización. Esto tiene el fin de facilitar el procesamiento de datos para el desarrollo del Detector de Anomalías. Así, a continuación se describe las categorías a utilizar para agrupar los modos de falla:

- **Falla mecánica:** Son todas aquellas fallas o detenciones que tengan relación directa con los equipos de estudio, en este caso las Bombas de transporte de arenas.
- **Falla eléctrica:** Son todas aquellas detenciones que afectan a las bombas de relaves, pero tienen un origen eléctrico. Aquí se incluyen fallas tanto de sensores de las bombas, como cortes de energía.
- **Falla desgaste:** Son todas aquellas fallas o detenciones mecánicas donde su origen está en el desgaste de piezas de la bomba. Aquí se consideran roturas por desgaste de piezas de la bomba o de líneas de alimentación de la bomba.
- **Falla manejo de equipo:** Son todas aquellas detenciones que poseen un origen de falla humana que con revisiones periódicas serían evitables. Aquí se consideran fallas relacionadas a bajos niveles de aceite, relleno de los depósitos de aceite, entre otros.
- **Falla filtro:** Son todas aquellas detenciones exclusivas del Sistema Abel y tienen relación con fallas relacionadas a los filtros de arena de las bombas. Aquí se consideran cambios de filtro por saturación de material particulado en estos.

Los criterios para clasificar la información para Sub Tipo detención varía en cada bomba, ya que cada una tiene sus propios modos de falla. Así, se pueden agrupar en grandes tópicos de acuerdo a la similitud de origen. El detalle de los modos de falla en cada categoría corresponde al desarrollo de esta memoria, por lo que se presentan en las secciones 4.2.1.1 y 4.2.2.1.

Además, cabe destacar que, para cada clasificación de falla, se considera desde el inicio de la parada hasta la puesta en marcha del activo. Esto ya que no se tiene la información detallada sobre el comportamiento de las detenciones, simplificando el proceso de etiquetado. Además, de esta manera se considera el peor de los casos donde la falla abarca más del tiempo real utilizado.

### 3.1.2. Extracción data PI

Corresponde a la búsqueda de variables monitoreadas por sensores y extracción de la información almacenada en PI ProcessBook. Es importante destacar que existen sensores que monitorean diversas variables de los sistemas de bombeo, pero no todos guardan su registro en PI ProcessBook. Es por esto que los TAG asociados a los sensores que se utilizarán son entregados por el personal de la empresa.

A continuación, en las Tablas 3.1 y 3.2 se presentan los TAG y sensores utilizados para la extracción de la data para cada sistema de impulsión de arena.

Tabla 3.1: TAGs con su respectiva fecha de obtención y descripción para Sistema Abel.

TAG	Fechas	Descripción
08_BA_BBA1_POT	15/09/2020 - 19/11/2021	Potencia Bomba 1
08_BA_BBA1_RPM.PV	15/09/2020 - 19/11/2021	RPM Bomba 1
08_BA_FIT203.PV	15/09/2020 - 19/11/2021	Flujo Bomba 1
FALTA INFO	15/09/2020 - 31/03/2022	Presión succión Bomba 1
FALTA INFO	15/09/2020 - 31/03/2022	Presión descarga Bomba 2
08_BA_BBA2_CTE.PV	15/09/2020 - 30/11/2021	Corriente VDF Bomba 2
08_BA_BBA2_FIT202.PV	15/09/2020 - 31/03/2022	Flujo arenas Bomba 2
08_BA_BBA2_PIT231.PV	15/09/2020 - 24/03/2022	Presión succión Bomba 2
08_BA_BBA2_PIT241.PV	15/09/2020 - 31/03/2022	Presión descarga Bomba 2
08_BA_BBA2_RPM.PV	15/09/2020 - 09/11/2021	RPM Bomba 2
08_BA_BBA3_CTE.PV	15/09/2020 - 30/06/2021	Corriente VDF Bomba 3
08_BA_BBA3_POT.PV	15/09/2020 - 30/06/2021	Potencia Bomba 3
08_BA_BBA3_RPM.PV	15/09/2020 - 30/06/2021	RPM Bomba 3
08_BA_FIT_201.PV	15/09/2020 - 30/06/2021	Flujo Bomba 3
08_BA_PIT_211.PV	15/09/2020 - 30/06/2021	Presión succión Bomba 3
08_BA_PIT_221.PV	15/09/2020 - 30/06/2021	Presión descarga Bomba 3

Tabla 3.2: TAGs con su respectiva fecha de obtención y descripción para Sistema Ash.

TAG	Fechas	Descripción
06_FIT481	30/12/2019	Flujo Sistema Ash
06_DIT170	21/05/2021	Densidad Sistema Ash

Como se observa en las Tablas, cada sensor posee distintos periodos de tiempo para el almacenamiento de la información. Así, se obtiene toda la data registrada para cada sistema en los periodos de tiempo especificados, a una tasa de muestreo de 1 minuto.

## 3.2. Caracterización del estado actual

Corresponde a una recopilación de información operacional y de mantenimiento relativa a los sistemas de impulsión de arenas. La información recopilada se divide en 2 categorías:

- **Levantamiento de la condición operacional de los Sistemas de Bombeo:** Se considera toda la información operacional disponible en los *Reportes Diarios Mensuales* para caracterizar el comportamiento de trabajo de los sistemas actualmente. En este caso, se extraen datos de variables operacionales tales como horas de funcionamiento, flujo trabajado, Budget de arenas y cantidad de arena real depositada, tanto de manera general como por sistema durante los 12 meses del año 2021.
- **Levantamiento de la condición de mantenimiento de los Sistemas de Bombeo:** Se considera toda la información de mantenimiento disponible en los *Reportes Diarios Mensuales* para caracterizar el estado de los sistemas. En este caso, se consideran datos de cantidad por detención, duración y motivo de estas. Por motivos de disponibilidad de información y evaluar el comportamiento en un periodo representativo, los resultados se muestran como un acumulado desde la fecha de inicio de registro hasta la fecha final de registro, tomando como guía las fechas de registro de la data existente en PI.

## 3.3. Análisis e identificación de puntos críticos de la operación

En base a la información de operación y mantención recopilada anteriormente, se analiza el desempeño e identifican los puntos críticos de cada sistema. Para este análisis, se realizarán actividades que sean de utilidad para una posterior búsqueda de planes de mejora. Entre las estrategias utilizadas se encuentran: Creación de catálogos de fallas y su estadística para visibilizar las que mayor incidencia tienen en el funcionamiento. Para esto se utilizará el Análisis de Pareto. Además, se realizará un cálculo de indicadores de mantenimiento tales como MTBF y MTTR para finalizar esta etapa.

### 3.3.1. Detección de anomalías

Paralelamente a estos cálculos, se desarrollará un Detector de Anomalías con la capacidad de realizar diagnóstico y pronóstico de la data, utilizando la información disponible en la empresa. De esta manera es posible introducir nuevas tecnologías en Anglo American. Para el desarrollo de esta herramienta se utilizará la plataforma DataBruin, entregada por el profesor guía de la comisión.

Cabe destacar nuevamente que, el objetivo de esta herramienta es probar nuevas tecnologías en la empresa con el fin de dar a conocer nuevas oportunidades de innovación para optimizar su trabajo. Por lo tanto la descripción de esta metodología es más bien general y no se entrará en el detalle de cada etapa.

A continuación, en la Figura 3.1 se presenta el método utilizado desde la adquisición hasta el desarrollo del modelo de manera general. Esta metodología se basa en el paper *Big Machinery Data Preprocessing Methodology for Data-Driven Models in Prognostics and Health Management*[17].

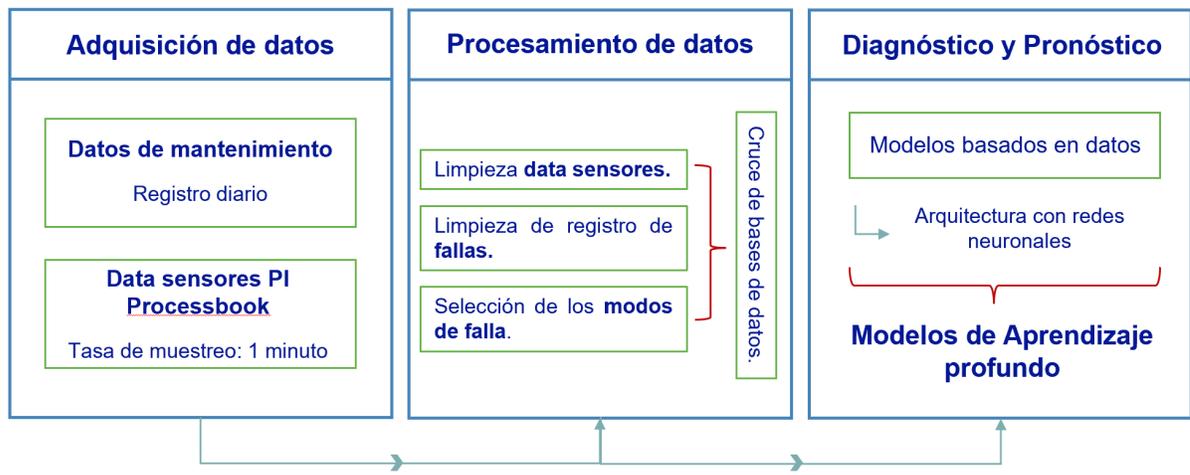


Figura 3.1: Metodología utilizada para realización de Detector de Anomalías.

Luego, se entrará en detalle de los tres pasos de la metodología utilizada.

1. **Adquisición de datos:** Esta etapa consiste en recolectar la data disponible de registros de mantenimiento e información de sensores para cada bomba. Este paso se relaciona directamente con la sección 3.1 descrita en este capítulo, ya que se utiliza el registro resultante de dicha sección.
2. **Procesamiento de datos:** Esta etapa consiste en la limpieza y preparación de los datos para su posterior uso. Así, se trabaja en la limpieza de ambos registros en paralelo. Primero, comenzando con el registro de sensores, se revisa la data para eliminar las filas de aquellos valores faltantes, valores nulos y valores duplicados. Luego, y solo para el caso de las Bombas Abel, como hay información para 8 sensores del sistema, se realiza una reducción de dimensionalidad con la técnica de PCA descrita en la sección 2.6.1.1. De esta manera, las bases de datos pertenecientes a los sensores de monitoreo de cada bomba quedan listas para su posterior uso.

En segundo lugar, continuando con la base de datos perteneciente al registro de mantenimiento para ambas bombas, se le realiza una limpieza enfocado en eliminar las filas de los días en que no hay registro y la eliminación de fechas perdidas. Luego se analizan los modos de falla descritos en la sección 3.1.1, donde se elimina de la base de datos las filas relacionadas a Detenciones indefinidas y Sin información. En cuanto a las Detenciones MNP, solo se utilizarán los siguientes modos de falla: Falla mecánica, falla eléctrica, falla desgaste y Falla filtro. De esta manera, Se asigna el estado de *Pausa* a las Detenciones

operacionales, MP y Falla eléctrica, y estado de *Falla* al restante de las Detenciones MNP. Para concluir, se filtra la base dejando el estado Normal y Falla, asignándole 0 y 1 respectivamente.

En tercer lugar, con las bases de datos listas, se realiza la sincronización concatenando ambos documentos y filtrando aquellas filas donde no haya información de etiqueta de estado. Una vez esto listo, se crean las ventanas de tiempo a trabajar para los modelos. En el caso del Pronóstico, también se define una ventana de tiempo a futuro para realizar su predicción. Además, el resultado de esta acción es la data ya dividida en testeo y entrenamiento, dejando para entrenamiento un aproximado del 80 % de la data, y el restante para testeo del modelo.

- 3. Diagnóstico y Pronóstico:** Esta etapa consiste en la formulación de la arquitectura a utilizar para los casos de diagnóstico y pronóstico en las Bombas de estudio. A grandes rasgos, se decide utilizar una arquitectura de Autoencoder, la cual considera un codificador y decodificador de la información. Luego, se definen las capas a utilizar y la cantidad de neuronas por capa. En este punto, se decide utilizar Redes Neuronales Recurrentes, donde las opciones son Redes LSTM o RNN convencionales. Adicional a esto, a cada capa de neurona se debe definir la Función de activación correspondiente, donde las opciones son Tanh y ReLU. Finalmente se agrega una capa Flatten seguida de una capa Densa para finalizar la arquitectura.

En la sección de Resultados se presentará la cantidad de capas, neuronas por capas y Función de activación utilizadas, ya que estos parámetros se definirán en base a los resultados obtenidos.

### 3.4. Selección de oportunidades de mejoras técnicas

Una vez identificados los puntos críticos en el funcionamiento de los Sistemas de Bombeo, se procede con la investigación de oportunidades de mejora que potencien el desempeño de las bombas en el Tranque de Relaves. Para esta investigación, se toma como base la problemática de los puntos críticos, enfocando la búsqueda en soluciones que disminuyan la causal e impacto de estos en la operación.

### 3.5. Evaluación técnico-económica de las propuestas de mejora

Corresponde a evaluar las oportunidades de mejora en marcándose en las siguientes etapas:

- **Evaluación técnica:** Se recopilan todos los requerimientos técnicos para cumplir con el objetivo de la mejora seleccionada.

- **Evaluación económica:** Se dará cuenta del gasto anual 2021 enfocado en los Sistemas de impulsión de arenas Ash y Abel. Luego se presentarán los valores cuantitativos que indicarán el valor final necesario de la inversión para las mejoras seleccionadas, enfocando la evaluación del proyecto en los ahorros que se obtendrían con la implementación de esas mejoras. Esta evaluación económica se realizará en la moneda económica creada para este informe *CoppCoin*.

# Capítulo 4

## Resultados

Se comienza con la caracterización del funcionamiento del estado actual de los sistemas de bomba en estudio, imprescindible para su posterior análisis y detección de falencias. Es importante recordar que esta caracterización estará enfocada solo en los Sistemas Abel y Sistemas Ash, sistemas actualmente en estudio.

### 4.1. Estado operacional

Así, se inicia por el plan de depositación de arenas para el año 2021, el cual se detalla a continuación en la Tabla 4.1. En esta tabla se puede distinguir que el Budget de arenas, que representa el plan de arenas del año, es mayor a la cantidad real de arena depositada, mostrando un déficit de 256,74 [kton], equivalente al 8,4%. Por lo tanto, durante el año 2021, se tuvo un cumplimiento del 91,6% de depositación de arenas, cantidad que incluye el aporte de los tres sistemas de arenas en funcionamiento.

Tabla 4.1: Plan de depositación de arenas vs arenas depositadas año 2021.

Mes	Budget [kton]	Budget acumulado [kton]	Real depositado [kton]	Real acumulado [kton]
Enero	252,81	252,81	192,89	192,89
Febrero	256,17	508,97	203,91	396,79
Marzo	265,39	774,36	254,36	651,15
Abril	232,19	1.006,55	234,04	885,19
Mayo	268,36	1.274,91	234,41	1.119,60
Junio	238,02	1.512,93	239,54	1.359,14
Julio	243,51	1.756,44	251,07	1.610,21
Agosto	252,85	2.009,28	260,02	1.870,22
Septiembre	246,87	2.256,15	248,41	2.118,63
Octubre	273,26	2.529,40	220,79	2.339,41
Noviembre	256,07	2.785,47	243,26	2.582,67
Diciembre	273,42	<b>3.058,89</b>	219,47	<b>2.802,15</b>
<b>TOTAL</b>	<b>3.058,89</b>	-	<b>2.802,15</b>	-

Luego, se incluye la Tabla 4.2 que señala las horas planificadas y reales de funcionamiento de los sistemas de arenas por mes. Se identifica que el mes con mayor cantidad de horas reales trabajadas es agosto, coincidiendo con el mes de mayor cantidad de arena depositada de la Tabla 4.1. Así mismo, en cuanto al cumplimiento de lo planificado, se presenta un déficit de 1.122 horas, equivalente al 12,8%. Por lo tanto, durante el año 2021, se tuvo un cumplimiento del 87,2% de las horas de trabajo planificadas, cantidad que incluye el aporte de los tres sistemas de arenas en funcionamiento.

Tabla 4.2: Horas de trabajo planificadas vs horas de trabajo reales en Sistemas de arenas, año 2021.

Mes	Horas plan	Acumulado horas plan	Horas reales	Acumulado horas reales
Enero	744	744	596,91	596,91
Febrero	672	1.416	531,74	1.128,65
Marzo	744	2.160	664,25	1.792,90
Abril	721	2.881	640,58	2.433,48
Mayo	744	3.625	621,01	3.054,49
Junio	720	4.345	653,82	3.708,31
Julio	744	5.089	672,60	4.380,91
Agosto	744	5.833	688,24	5.069,15
Septiembre	719	6.552	654,47	5.723,62
Octubre	744	7.296	612,26	6.335,88
Noviembre	720	8.016	677,01	7.012,89
Diciembre	744	<b>8.760</b>	625,01	<b>7.637,90</b>
<b>TOTAL</b>	<b>8.760</b>	-	<b>7.637,90</b>	-

Así, lo anterior se representará en el gráfico de la Figura 4.2. En este, se identifica que los meses de abril, junio, julio, agosto y septiembre se logra el desempeño esperado en relación a cumplimiento de Budget solicitado. No se concluye lo mismo para el resto de los meses, donde se destaca el mes de enero como el mes en que hay mayor déficit de depositación de arenas.

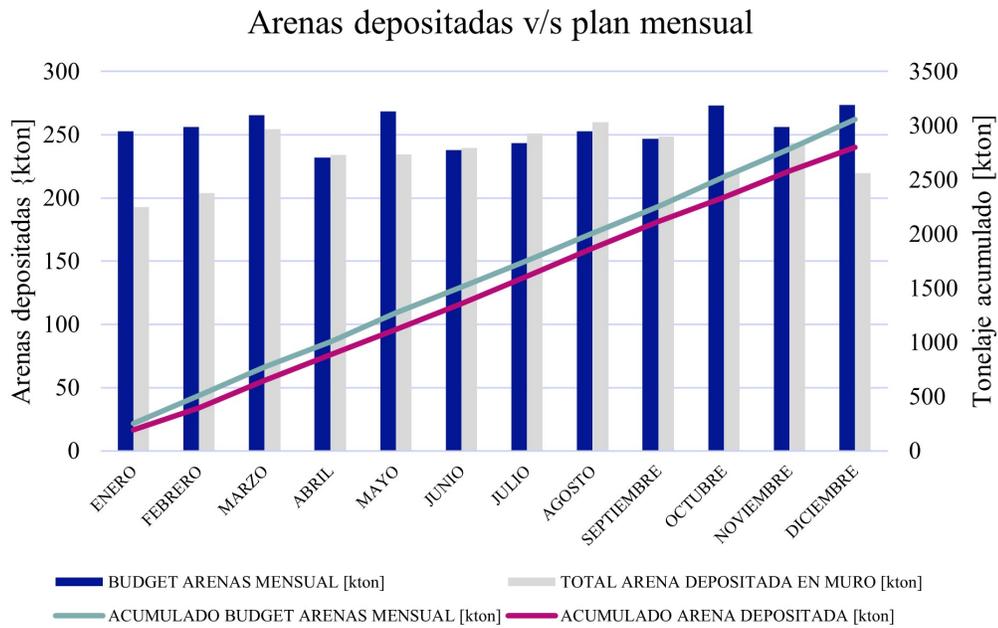


Figura 4.1: Budget mensual de arenas vs cantidad real depositada año 2021.

La distribución de arena depositada por sistema está representada en el gráfico de la Figura 4.2, acompañado de la Tabla 4.3 que indica la cantidad por cada uno.

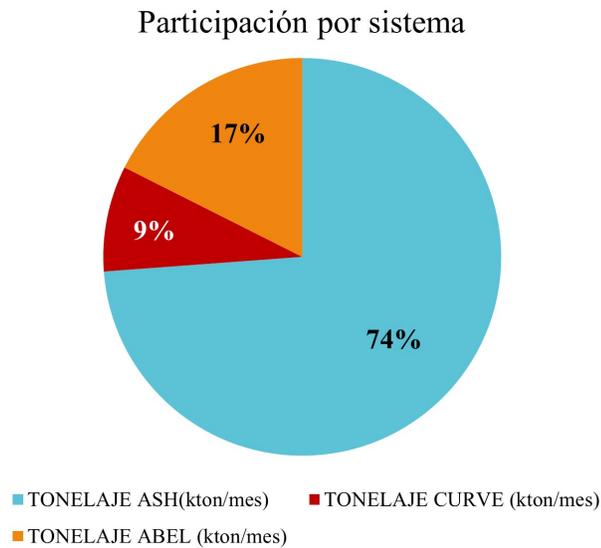


Figura 4.2: Participación por sistema

Tabla 4.3: Parámetros operacionales año 2021 para Sistemas de Arenas.

	Sistema Ash	Sistema Abel	Sistema Curve
<b>Arenas</b>	2.069	493	241
<b>Horas operativas</b>	5.451	1.250	1.099

De estos, se aprecia que el sistema de arena que más contribuyó, en comparación a los otros, es el Sistema Ash con un 74% de la participación total, traducido en 2.069 [kton] durante el año 2021. En segundo lugar, se encuentra el Sistema Abel con un 17% de participación, equivalente a 493 [kton] y el Sistema Curve, con un 9% de participación equivalente a 241 [kton]. El desglose de cada uno se estudiará en las siguientes secciones.

#### 4.1.1. Sistema Ash

Como ya se presentó en la Tabla 4.3, para el año 2021 se cumplió con una depositación de arenas de 5.451 kilotoneladas. De acuerdo a la Tabla 4.4, el mes con mayor cantidad de material movido es septiembre con 231,24 [kton]. Asimismo, se puede destacar los meses de enero, febrero, marzo y mayo hubo menos movimiento de arenas, ubicándose por debajo de los 150 [kton]. Luego, al observar la Figura 4.4, se corrobora gráficamente la información anterior, y se da cuenta que, nuevamente, septiembre es el mes más eficiente en comparación al resto en cuanto a la depositación de arena. Esto ya que presenta el mayor Flujo del año con 286,15 [mm<sup>3</sup>/hrs]. Para el caso de noviembre, mes que le sigue en arena movida, presenta un Flujo de 277,65 [mm<sup>3</sup>/hrs]. Si bien entre septiembre y noviembre existe una diferencia de 0,48 [kton], en este último se trabajan 5,21 hrs más.

Tabla 4.4: Información operacional disponible Sistema Ash, año 2021.

Mes	Arenas [kton]	Arenas acumuladas	Horas	Horas acumuladas	Flujo
Enero	131,96	131,96	354,42	354,42	195,33
Febrero	144,42	276,37	369,30	723,72	242,83
Marzo	67,15	343,52	170,66	894,38	199,47
Abril	202,95	546,47	556,66	1.451,04	260,72
Mayo	143,53	690,00	375,53	1.826,57	240,75
Junio	150,55	840,54	398,82	2.225,39	215,84
Julio	177,12	1.017,66	462,73	2.688,12	228,45
Agosto	204,39	1.222,05	528,99	3.217,11	243,92
Septiembre	231,24	1.453,29	598,06	3.815,17	286,15
Octubre	182,22	1.635,52	469,02	4.284,19	245,73
Noviembre	230,76	1.866,28	603,27	4.887,46	277,65
Diciembre	202,42	<b>2.068,70</b>	563,00	<b>5.450,46</b>	253,74
<b>TOTAL</b>	<b>2.068,70</b>	-	<b>5.450,46</b>	-	<b>240,88</b>

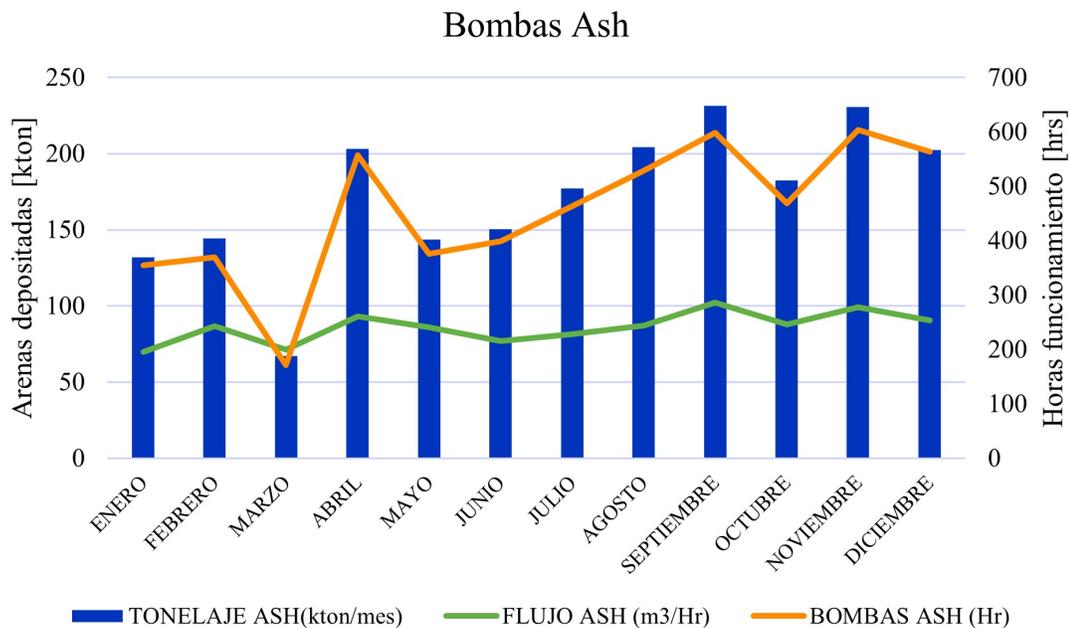


Figura 4.3: Rendimiento Bombas Ash, año 2021.

Adicional a esto, a continuación en la Tabla 4.5 se refleja la tasa de arena depositada por el Sistema Ash, la cual se mide en kilotoneladas de arenas movidas por hora para todo el año 2021.

Tabla 4.5: Tasa de depositación por hora para el Sistema Ash, año 2021.

Tonelaje [kton/anual]	Horas 2021	Tasa arenas [kton/hrs]
2069	5451	0,38

#### 4.1.2. Sistema Abel

Como ya se presentó en la Tabla 4.3, el Sistema Abel, para el año 2021, cumplió con una deposición de arenas de 493 [kton]. De acuerdo a la Tabla 4.6, el mes con mayor cantidad de material movido es marzo con 177,22 [kton] equivalente al 36 % del total para el sistema. Asimismo, se destaca que desde el mes de mayo, el movimiento de arenas comienza a disminuir, donde en septiembre presenta una drástica baja hasta llegar a diciembre con movimiento cero [kton]. Luego, la Figura 4.4 corrobora gráficamente los datos anteriores, destacándose el peak de arena movida de marzo. Seguidamente, si bien este sistema presenta un mayor Flujo que el Sistema Ash, debido a problemas mecánicos que se analizarán en la siguientes secciones, tuvo pocas horas de funcionamiento.

Paralelamente, se nombró que marzo es el único mes con un funcionamiento notoriamente mayor. Esto es debido a decisiones internas de la empresa de potenciar el uso de estas bombas por sobre el Sistema Ash. Recordar que ambos sistemas de bombas cumplen la misma función, por lo que solo uno de ellos opera y el otro debe estar detenido.

Tabla 4.6: Información operacional disponible Sistema Abel, año 2021.

Mes	Arenas [kton]	Arenas acumuladas	Horas	Horas acumuladas	Flujo
Enero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Febrero	52,02	52,02	132,43	132,43	267,61
Marzo	177,22	229,25	448,18	580,61	294,72
Abril	23,04	252,28	57,92	638,53	310,79
Mayo	75,50	327,78	189,42	827,95	301,83
Junio	61,30	389,09	156,91	984,86	298,29
Julio	53,77	442,86	139,00	1.123,86	260,15
Agosto	40,70	483,56	102,25	1.226,11	287,54
Septiembre	4,38	487,95	10,50	1.236,61	305,00
Octubre	4,27	492,21	12,00	1.248,61	280,00
Noviembre	0,37	492,59	1,00	1.249,61	297,00
Diciembre	0,00	<b>492,59</b>	0,00	<b>1.249,61</b>	0,00
<b>TOTAL</b>	<b>492,59</b>		<b>1.249,61</b>		<b>241,91</b>

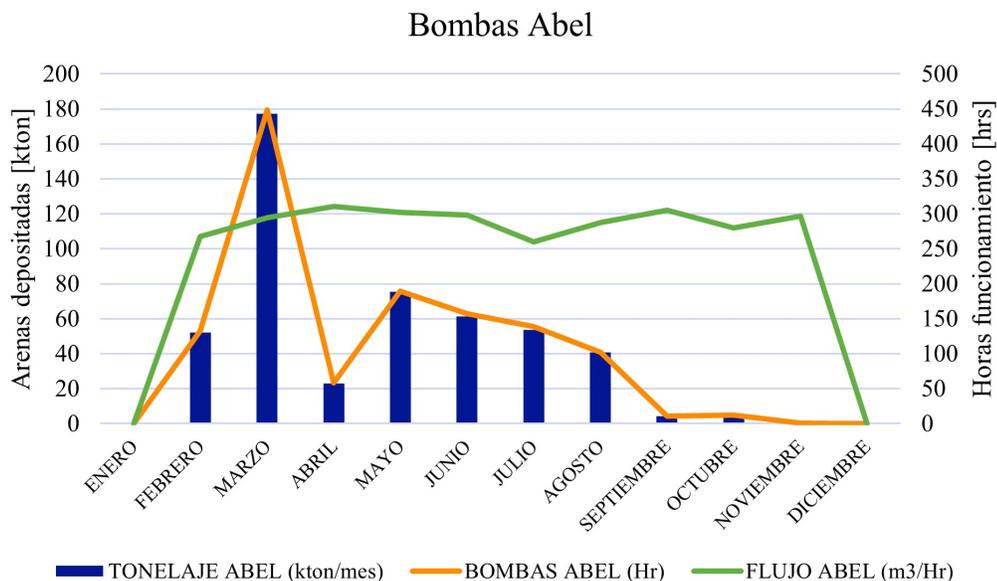


Figura 4.4: Rendimiento Bombas Abel, año 2021.

Adicional a esto, a continuación en la Tabla 4.7 se refleja la tasa de arena depositada por el Sistema Abel, la cual se mide en kilotoneladas de arenas movidas por hora para todo el año 2021.

Tabla 4.7: Tasa de depositación por hora para el Sistema Abel, año 2021.

Tonelaje [kton/anual]	Horas 2021	Tasa arenas [kton/hrs]
493	1250	0,39

## 4.2. Estado de mantenimiento

Para esta sección, se presentan los resultados extraídos del levantamiento de información realizado en la etapa preliminar al desarrollo de este trabajo. Los datos se expondrán para cada bomba por separado.

Es importante destacar los rango de fechas para cada sistema. Desde la empresa no se presenta un registro de la información en el mismo espacio temporal para cada uno, por lo que a continuación se detalla el rango utilizado:

- **Sistema Ash:** Desde 1 de diciembre del 2019 hasta el 28 de febrero, año 2022.
- **Sistema Abel;** Desde 15 de septiembre del 2020 hasta 10 de noviembre del 2021.

### 4.2.1. Sistema Ash

Se presenta data de 27 meses de funcionamiento de este sistema de bombas. Durante este periodo, las bombas Ash son las principales en la distribución de arenas de relaves sobre el muro del tranque. Además, es importante recordar que el funcionamiento planeado es de 24 horas diarias.

Así, en la siguiente Tabla 4.8 con su respectivo gráfico de la Figura 4.5, se destaca que el 46% del tiempo corresponde a *Horas en detención*. Este valor, en comparación a las *Horas operativas*, es considerable ya que poseen magnitudes similares, solo difiriendo por 1.665 [hrs], equivalente a un 4% del tiempo total.

Sin embargo, el valor total de horas para *Horas detenidas* incluye la suma del tiempo de todas las detenciones presentadas en el equipo, tanto de origen mecánico de la propia bomba como de origen externa a ella.

Tabla 4.8: Horas de funcionamiento y detención para periodo Sistema Ash

Horas operativas	Horas detenidas	Horas totales
10.700,55	8.588,08	19.288,63



Figura 4.5: Horas operativas vs horas detenidas, periodo de estudio.

Luego, se observa la siguiente Tabla 4.9, en conjunto con su gráfico de la Figura 4.6, que muestra el desglose del parámetro *Horas detenidas* de la Tabla anterior. Acá se observa que el 79 % del tiempo, y el 74 % de la cantidad de detenciones, es causado por las Detenciones operacionales, momentos en donde el equipo no está en funcionamiento pero se encuentra disponible.

Después, se presentan las detenciones por causa Indefinida, sumando el 10 % del total de horas detenidas. Pero tomando como referencia la cantidad de detenciones presentadas y no la suma de horas, se destacan las Detenciones MNP con el 13 % de la cantidad total y el 7 % de la suma de horas. En último lugar se tienen las detenciones MP, las cuales aportan el 3 % a las horas totales, y solo el 4 % en la cantidad.

Las detenciones Sin Información aportan el 1 % a las horas total de Detenciones, lo cual es bueno considerando que, en total, solo se pierden 84 horas de información para este caso.

Tabla 4.9: Detalle de los tipos de detenciones Sistema Ash.

Detención	Cantidad	Horas acumuladas
Operacional	576	6.759,81
MP	28	233
MNP	98	602,03
Indefinida	67	909,24
Sin Información	7	84



Figura 4.6: Detenciones en función de las horas acumuladas, periodo de estudio Sistema Ash.

#### 4.2.1.1. Análisis de pareto

Luego de estudiar las detenciones a modo general, es importante analizar cuales son los modos de falla más frecuente y cuales afectan mayormente a la continuidad de operación.

Cabe destacar que, debido a la diferencia de periodos de tiempo en el registro de la información, las horas de cada modo de falla se transforman a un porcentaje en función de las horas totales del sistema en estudio. Es decir, si un modo de falla aporta 6 horas en total, este valor se divide por las Horas totales de funcionamiento del sistema, datos que se pueden encontrar en las Tablas 4.8 y 4.15 para los Sistemas Ash y Abel respectivamente. Esto se realiza con el objetivo de homogeneizar los datos y que los Gráficos de Pareto sean comparables entre cada sistema. Así, en primer lugar, se tienen los siguientes modos de falla para las Detenciones operacionales, presentados en la Tabla 4.10:

Tabla 4.10: Modos de falla para Detenciones operacionales, Sistema Ash.

Detención Operacional	Cantidad	Horas totales
Detención Molino SAG	91	923,70
Rotura de línea	73	718,89
Mantenimiento estación ciclones	25	406,64
Problemas en flujo	59	345,70
Embanques	46	330,64
Falla estación ciclones	27	97,26
Corte de energía	7	88,00
Detención equipos planta	7	80,50
Cambio de nudo	111	79,89
Otros	3	62,75
Agua contaminada	3	29,30
Nudo lleno	6	25,53
Bajo nivel laguna	1	24,00
Falla válvula	3	20,50
Bajo voltaje	2	15,50
Falla nudo	3	12,02
Falta de agua	1	12,00
Lavado de línea	3	9,93
Falla sistema curve	1	5,67
Falla UPS	1	5,00
Cambio de Bomba Ash	1	1,00
Prueba de equipo*	14	183,91
Cambio de equipo*	77	3102,14
Cambio a Sistema Curve*	11	131,25

De esta Tabla se puede dar cuenta que las paradas causadas por Detenciones Molino SAG son las que más horas acumulan, acumulando el 8,61 % de las horas totales de funcionamiento. Luego, para determinar cuales son las detenciones más influyentes en la operación de las bombas, además de las Detenciones por Molino SAG, se realizan Diagramas de Pareto obteniendo el siguiente resultado:

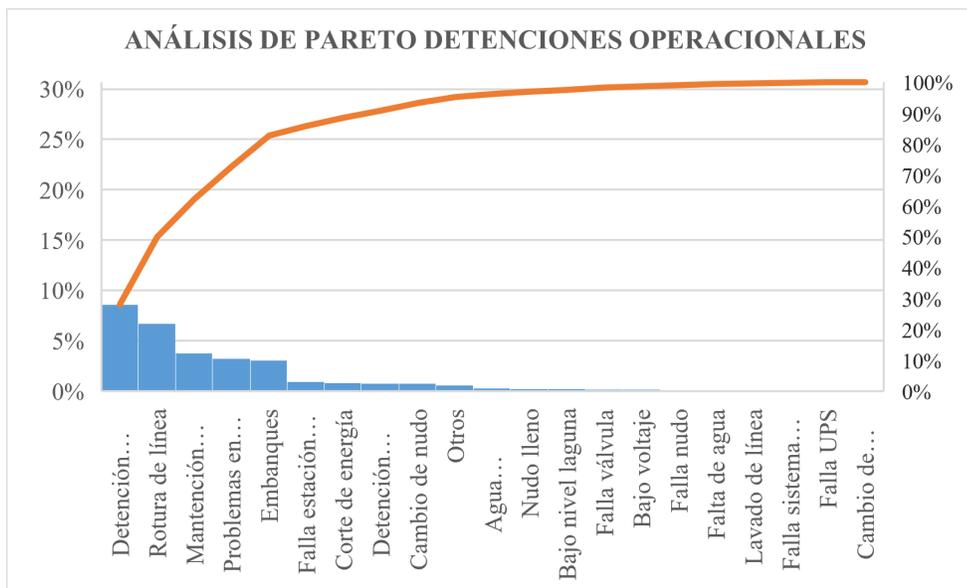


Figura 4.7: Análisis de Pareto para detenciones operacionales, Sistema Ash.

Del gráfico de la Figura 4.7, se extrae que el 80 % del tiempo detenido por Detenciones operacionales son causadas por el 23 % de los modos de falla, cada uno descrito a continuación:

- **Detención Molino SAG:** Detenciones provocadas por detención del funcionamiento del Molino SAG.
- **Rotura de línea:** Detenciones provocadas por roturas en las líneas de distribución de arena ubicadas a lo largo de muro, desde el nudo cero hasta el nudo 10.
- **Mantenición estación ciclones:** Detenciones provocadas por mantención de ciclones, harnero y estanque agitador.
- **Problemas en flujo:** Detenciones provocadas por Golpes de carga, Flujo inestable, Exceso de piedras, Dilución alta, Bajo flujo y Alta densidad en el flujo transportado por las bombas.
- **Embanques:** Embanques de las líneas de distribución o de los nudos de descarga.

Así, se obtienen las cinco detenciones operacionales más considerables para la Bombas Ash. No obstante, en la Tabla 4.10 se tienen 16 modos de fallas que no toman relevancia en el Análisis de Pareto, hecho que puede verse afectado por la clasificación de las detenciones. Es probable que con una mejor clasificación en torno al origen real de las detenciones, los modos de falla disminuyan considerablemente, haciendo del gráfico de Pareto una herramienta más óptima en su uso.

Continuando con los modos de falla de la Tabla, al final de esta se rescatan tres categorías marcadas con asteriscos: Prueba de equipo, Cambio de equipo y Cambio a Sistema Curve. Con el objetivo de mostrar la información, se decide dejar estos tres modos de falla en la Tabla, pero no se toman en cuenta para el análisis de Pareto. Esto debido a que las detenciones

nombradas tienen relación a los momentos en que las Bombas Ash se encontraban fuera de operación por priorizar el funcionamiento de los otros Sistemas de Bombeo. Como esto no se consideran fallas de la operación, se dejan fuera del análisis.

Siguiendo con los Tipos de detenciones, se exponen las Detenciones MNP donde los modos de falla se presentan en la siguiente Tabla 4.11:

Tabla 4.11: Modos de falla para Detenciones MNP, Sistema Ash.

Detenciones MNP	Cantidad	Horas totales
Rotura de línea	25	140,34
Rotura válvula	6	81,09
Pérdida de carga	24	79,08
Falla empaquetadura	8	60,75
Falla bombas	8	60,09
Rotura manifold	6	51,51
Rotura de carcaza	5	38,33
Rotura Y sistema Abel	1	28,50
Falla variador	2	19,00
Falla mangueras	3	12,00
Instalación manifold	1	12,00
Filtración de arena	1	10,25
Rotura unión vitaulic	1	5,83
Falla prensa	3	1,34
Problema con tarjeta PLC	1	1,00
Soltura de perno prensa estopa	1	1,00
Cambio de bomba	1	0,67
Filtración válvula	1	0,25

De esta Tabla se puede extraer que las detenciones causadas por Roturas de línea son la más influyentes para este caso, acumulando el 1,31 % de las horas totales de funcionamiento. Así pues, para determinar cuáles son las detenciones más importantes en la operación de las bombas, además de la nombrada anteriormente, se realiza el Diagrama de Pareto obteniendo el siguiente resultado, representado en la Figura 4.8.

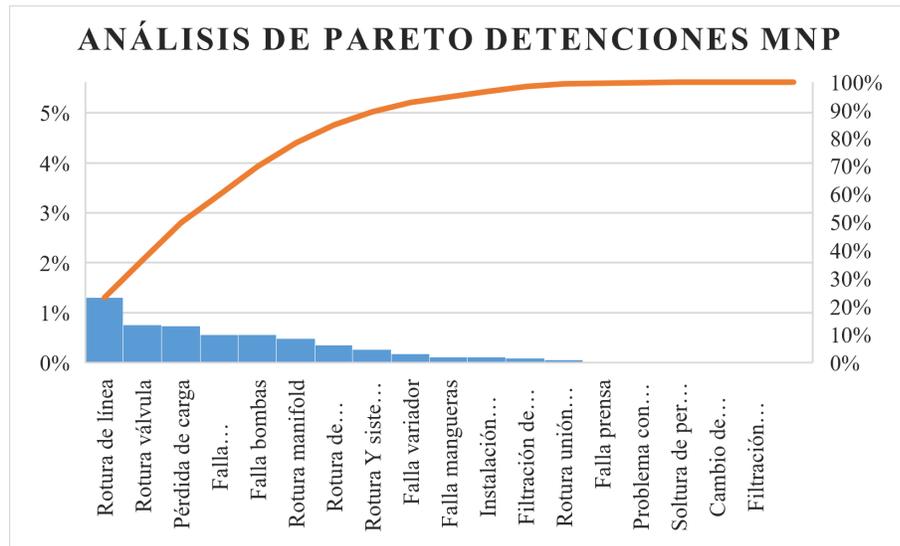


Figura 4.8: Análisis de Pareto para detenciones MNP, Sistema Ash.

Del gráfico se deduce que el 80 % del tiempo detenido por Detenciones MNP son generados por el 27 % de los modos de falla que se describen a continuación:

- **Rotura de línea:** Detenciones provocadas por roturas en las líneas que están alrededor las bombas, como líneas de alimentación o de salida.
- **Rotura de válvula:** Detenciones provocadas por diversos tipos de fallas y roturas en las válvulas de las bombas.
- **Problemas de carga:** Detenciones provocadas por baja presión en la bombas, originadas por falla en la prensa de las bombas.
- **Falla empaquetadura:** Detenciones provocadas por falla en la empaquetadura de las bombas, ya sea por desgaste o mal montaje de las mismas.
- **Falla bombas:** Detenciones provocadas por diversas fallas de origen mecánico en la bombas, tales como cortes de correas, roturas de ejes, entre otros.
- **Falla manifold:** Detenciones provocadas por roturas y cambios de manifold en las bombas.

Así, se obtienen las cinco detenciones MNP que más afectan a las Bombas Ash. Sin embargo, en la Tabla presentada se pueden contar que existen 12 modos de falla más a los descritos y que no toman relevancia en el Análisis de Pareto. Como se dijo anteriormente, esto puede verse afectado por la clasificación de las detenciones, en donde si existiese una mejor clasificación en torno al origen de estas, los modos de falla serían menor. De esta manera, se vuelve más eficiente el análisis del gráfico de Pareto.

Finalmente se tienen los modos de falla para la Detenciones MP. En la Tabla 4.12 se distinguen las dos clasificaciones para este caso, prevaleciendo las mantenciones programadas

a las Bombas Ash. Así, no se requiere realizar Diagrama de Pareto para el análisis de estos modos de falla.

Tabla 4.12: Modos de falla para Detenciones MP, Sistema Ash.

Detenciones MP	Cantidad	Horas acumuladas
Mantenimiento programada Bombas Ash	26	222,50
Mantenimiento Línea matriz	2	10,50

En resumen, de las Detenciones operacionales y MNP se rescatan que los modos de falla que más afectan a la continuidad operativa de las bombas son las Detenciones de Molino SAG, Roturas de las líneas de distribución de arena, Roturas de líneas de alimentación y salida de bombas y Roturas y fallas en válvulas.

#### 4.2.1.2. Indicadores de mantenimiento

Luego de haber estudiado las detenciones que más afectan a la continuidad operativa de los dos sistemas de bombeo en estudio, se procede a cuantificar indicadores de mantenimiento que apoyen al estudio de su comportamiento. Para este cálculo se utiliza la estadística mensual de fallas en el sistema. Esta información se puede encontrar en la Tabla B.1 ubicada en Anexos, ya que no se tratará directamente en este trabajo.

En primer lugar, se calcula el KPI Mean Time Between Failure (MTBF) con la información mensual disponible en la Tabla B.3. Para privilegiar los datos más críticos, se exponen en la Tabla 4.13 los meses en que el valor del MTBF fue el más alto, basándose en los peaks alcanzados con respecto a los otros meses. Acompañado de esto, también se detallan los valores de Horas de funcionamiento, Horas detenidas y cantidad de fallas por mes. Cabe destacar que, en el valor de Horas detenidas solo se considera el tiempo por Detenciones MNP, al igual que la cantidad de fallas.

Tabla 4.13: Información mensual KPI's de mantenimiento puntos críticos, MTBF.

Meses	Horas funcionamiento	Horas detenidas	Fallas	MTBF
dic-19	500	115	11	45,45
ene-20	415	20	8	51,93
may-20	377	25	7	53,89
nov-20	370	88	7	52,82
ene-21	354	46	6	59,07

Así, se destaca el mes de diciembre 2019, donde se obtiene el menor MTBF de 45,45 horas, indicando que, en promedio, cada 1 día y 21,36 [hrs] se produce una detención. Luego, continúan los meses de enero 2020, noviembre 2020 y mayo 2020 con valores similares de MTBF para terminar con enero 2021 con un MTBF de 59,07 [hrs] en el que, en promedio, cada 2 días y 11,04 [hrs] ocurre una detención.

Todos los datos explicados anteriormente se pueden ver gráficamente en la siguiente Figura 4.9, donde de la curva los 5 puntos más bajos corresponden a la información expuesta en el párrafo anterior. También se destacan 5 meses en los cuales el MTBF es nulo, indicando buen desempeño del sistema dado que no hubieron Detenciones MNP.

Por otro lado, se presentan seis peaks distinguibles fácilmente en el gráfico, que corresponden a los meses con el valor del MTBF más alto en el periodo. De estos, se destaca el mes de enero 2022 el cual presenta solo una detención y su valor del MTBF alcanza las 531 [hrs].

De manera general, del gráfico se aprecia una mejora en el rendimiento de las bombas, en el cual desde los meses de mayo a noviembre del 2021 hay un aumento sostenido de arenas depositadas acompañado de una baja del MTBF. Luego, los meses entre diciembre 2021 y febrero 2022 ocurre una baja de deposición de arenas, pero los valores del MTBF se mantienen altos, indicando que esta baja no se ve mayoritariamente afectada por Detenciones MNP, las que se contabilizan en dos detenciones para diciembre, 1 detención para enero y 2 detenciones para febrero.

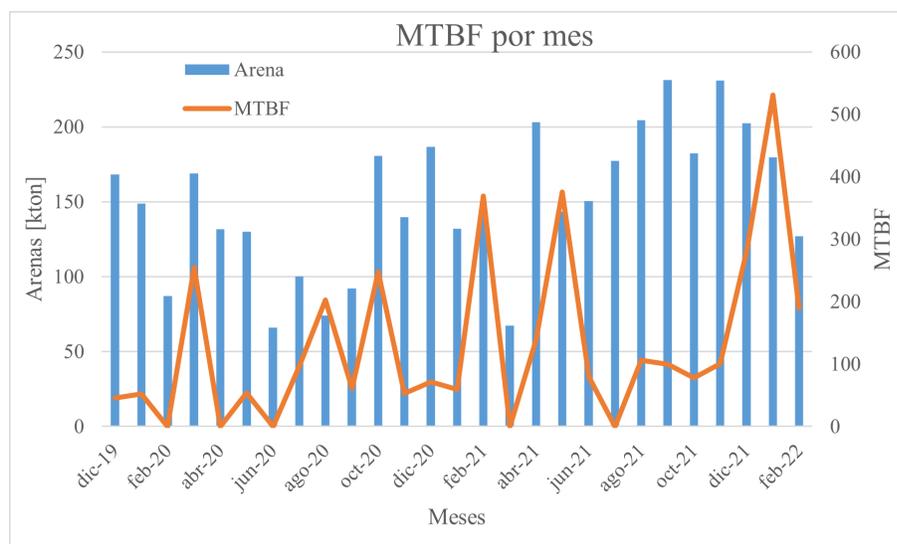


Figura 4.9: Valores mensuales de MTBF vs Arenas depositadas, Sistema Ash.

Por otra parte, se calcula el KPI Mean Time to Repair (MTTR) con la misma información disponible en la Tabla B.3. Al igual que en el caso anterior, y para privilegiar los datos más críticos, en la Tabla 4.14 se exponen los meses en que el valor de MTTR es el más alto en comparación al resto de la información.

De acuerdo a esto, se destaca que diciembre 2020 fue el mes con mayor MTTR, tomando un valor de 18,86 [hrs] en reparar una falla mecánica no programada. En seguida, el resto de los meses poseen MTTR similares que varía entre las 10,06 y 12,52 [hrs]. De estos, el mes de

abril 2021 demora en promedio 10,06 [hrs] en reparar una falla.

Tabla 4.14: Información mensual KPI's de mantenimiento puntos críticos, MTTR, Sistema Ash.

Meses	Horas funcionamiento	Horas detenidas	Fallas	MTTR
dic-19	500	115	11	10,41
nov-20	370	88	7	12,52
dic-20	500	132	7	18,86
abr-21	557	40	4	10,06
ene-22	531	12	1	12,00
feb-22	379	25	2	12,25

Estos datos se presentan gráficamente en la Figura 4.10, de la cual los seis peaks distinguibles corresponden a los meses descrito en la Tabla 4.14, todos valores sobre 10 [hrs]. Luego, existen siete meses que poseen valores de MTTR entre 10 y cuatro [hrs] y nueve meses que poseen valores de MTTR mayores que cero y menores que cuatro horas. Además, se tienen cinco meses con MTTR nulo, indicando que durante este tiempo no hubo detenciones mecánicas no programadas.

Así, de manera general, es mayor la cantidad de meses que el valor de MTTR es bajo, menor a cuatro horas, o nulo. indicando que, en promedio, el tiempo que toma el procesos de reparación se mantiene bajo.

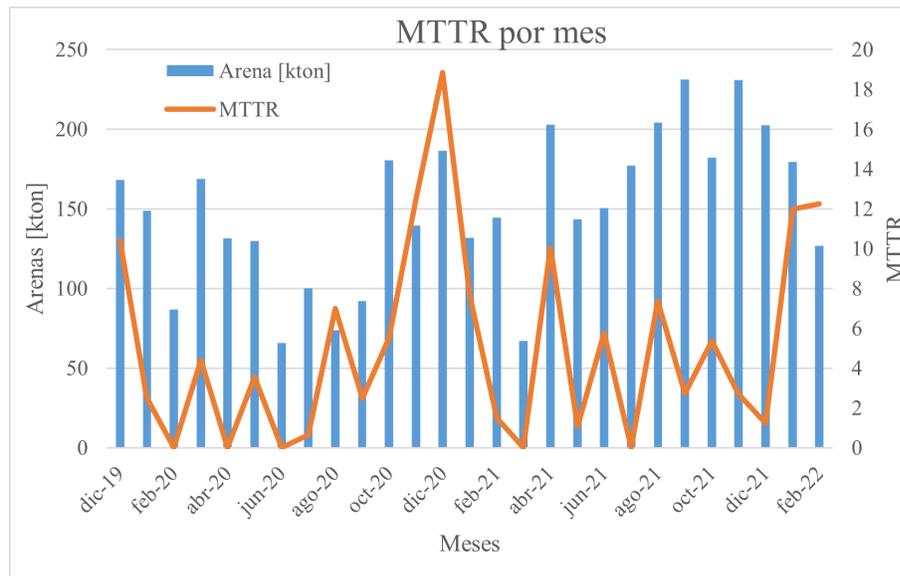


Figura 4.10: Valores mensuales de MTTR vs Arenas depositadas, Sistema Ash.

Comparando ambos indicadores, los meses de diciembre 2019 y noviembre 2020 son los cuales el MTBF es bajo y el MTTR es alto. Esto indica que durante estos dos meses, la

gestión del mantenimiento de estas bombas no fue eficiente.

#### 4.2.2. Sistema Abel

De acuerdo al periodo especificado al inicio de la sección, para este sistema de bombas se presenta data de 14 meses de funcionamiento. Durante este tiempo, las Bombas Abel se intentan potenciar para convertirse en el principal sistema de transporte de arenas en vez de las Bombas Ash. El funcionamiento planeado es de 24 horas diarias.

Así, se presenta la siguiente Tabla 4.15 con su respectivo gráfico de la Figura 4.11, en el cual se destaca que el 50 % del tiempo corresponde a *Horas detenidas* y el 50 % del tiempo restante corresponde a *Horas operativas*, solo habiendo una diferencia de 49 minutos a favor de las horas en operación. Es importante notar dos aspectos de esta información: El ítem Horas detenidas toma en cuenta todas las horas asociadas a detenciones, sin importar su origen, y de manera general, el cálculo de estos tiempos fue estimado, ya que el registro de detenciones no es específico en la duración real y horas de término para cada caso.

Tabla 4.15: Horas de funcionamiento y detención para periodo Sistema Abel.

Horas operativas	Horas detenidas	Horas totales
2.808,95	843,65	3.652,6



Figura 4.11: Horas operativas vs horas detenidas, Sistema Abel.

Luego se observa la siguiente Tabla 4.16, en conjunto con su gráfico de la Figura 4.12, en los cuales se muestra el desglose del parámetro *Horas detenidas* de la Tabla anterior. Acá se observa que el 67 % del tiempo, sumado al 52 % de la cantidad de detenciones, es causado por las Detenciones MNP, momentos en los cuales las bombas no se encuentran disponibles por fallas mecánicas del sistema.

Posteriormente se presentan las detenciones por causas operacionales, sumando el 27 % del total de horas detenidas y con el 37 % de la cantidad de detenciones. Luego se continua con las Detenciones MP, las cuales representan el 3 % del tiempo detenido y el 6 % de la cantidad de detenciones. Finalmente se tienen las Detenciones indefinidas, las cuales representan el 0,2% de las horas en detención y el 3% de la cantidad total de detenciones. Esto es una buena proporción, ya que solo se tienen 5,1 horas en donde no se tiene identificada la causa de la detención.

De manera separada, se detalla las Detenciones Sin Información las cuales aportan el 2 % a las horas en detención, lo que se considera bueno ya que, en total, solo se pierden 72 horas de información para las detenciones de la bomba.

Tabla 4.16: Detalle de los tipos de detenciones Sistema Abel.

Detención	Cantidad	Horas acumuladas
Operacional	67	290,35
MP	10	84,5
MNP	95	463,7
Indefinida	6	5,1
Sin Información	3	72

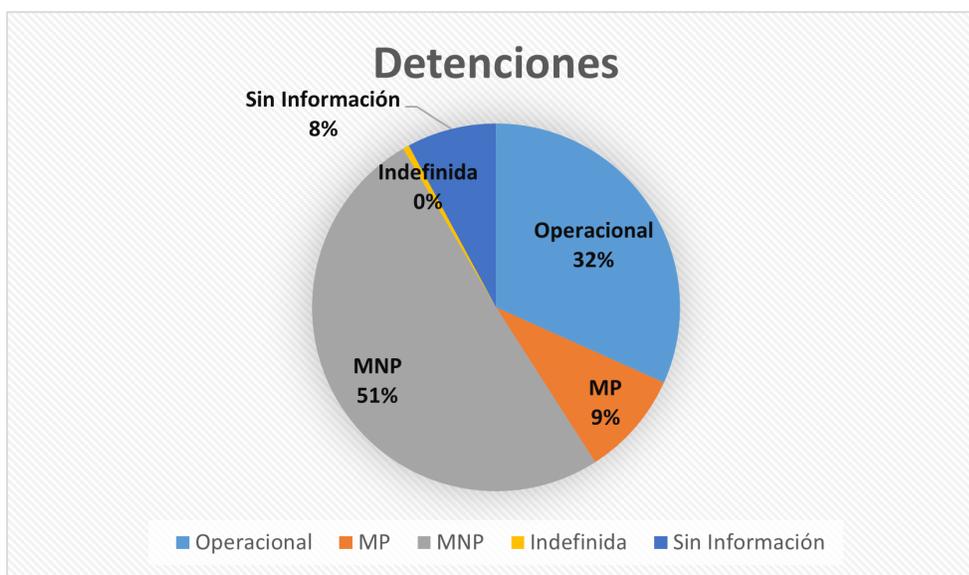


Figura 4.12: Resumen detenciones, Sistema Abel.

#### 4.2.2.1. Análisis de Pareto

En esta sección se estudiarán cuáles son los modos de falla que más impactan y afectan a la continuidad operativa de la bomba. Al igual que para las Bombas Ash, para este análisis y creación de los gráficos de Pareto, se transforman las horas de cada modo de falla a un porcentaje en función de las horas totales del sistema en estudio, datos que se pueden encontrar en la Tabla 4.15 para el Sistema Abel. Por lo que, a continuación, en la Tabla 4.17 se presentan los modos de falla para las Detenciones operacionales:

Tabla 4.17: Modos de falla para Detenciones operacionales Sistema Abel.

Detención Operacional	Cantidad	Horas totales
Detención Molino SAG	15	86,92
Problemas en flujo	7	34,00
Rotura de línea	10	32,58
Mantenimiento estación ciclones	2	27,25
Falla estación ciclones	8	20,00
Embanque	2	19,00
Mantenimiento equipos tranque	1	13,50
Corte de energía	1	12,00
Lavado de línea	2	10,75
Cambio nudo	11	6,50
Múltiples fallas	1	6,00
Sobre presión	1	6,00
Cambio de válvula	1	5,50
Falla comunicación	1	5,00
Descarga al directo	1	2,00
Llenado de nudo	1	2,00
Bajo nivel estanque	1	0,67
Reseteo de bomba	1	0,17
Fuera de operación*	84	10881,25

De esta Tabla, se puede dar cuenta que las paradas causadas por las detenciones de Molino SAG son las que más horas acumulan, llegando al 2,38% de las horas totales de funcionamiento. Luego, para analizar cuáles son las detenciones que influyen en la operación, además de la nombrada, se procede con la realización del Diagrama de Pareto, obteniendo el siguiente resultado, mostrado en la Figura 4.13.

De este gráfico se extrae que el 80% del tiempo detenido por Detenciones operacionales son causadas por el 31% de los modos de falla descritos a continuación:

- **Detención Molino SAG:** Detenciones provocadas por detención del funcionamiento del Molino SAG.

- **Problema en flujo:** Detenciones provocadas por Golpes de carga, Flujo inestable, Excesos de piedras, Dilución alta, Bajo flujo y Alta densidad en el flujo transportado por las bombas.
- **Rotura de línea:** Detenciones provocadas por roturas en las líneas de distribución de arena, ubicadas a lo largo del muro.
- **Mantenimiento estación ciclones:** Detenciones provocadas por mantenimiento de ciclones, harnero y estanque agitador.
- **Falla estación ciclones:** Detenciones provocadas por diversas fallas en los equipos pertenecientes a la Estación de Cicloneaje.
- **Embanques:** Detenciones provocadas por embanques en las líneas de distribución o en los nudos de descarga.

De esta manera se obtienen las cinco detenciones operacionales más considerables para las Bombas Abel. No obstante, en la Tabla 4.17 se encuentran 13 modos de fallas, además de los descritos anteriormente. Estos 13 modos de fallas adicionales no son relevantes para en Análisis por su bajo aporte. Con una mejor clasificación de los modos de falla, se podría conseguir disminuir la cantidad de estos, aumentando la eficiencia del Gráfico de Pareto.

De la información de la Tabla, se decide dejar fuera de este análisis las categorías *Fuera de operación*, ya que estas detenciones están relacionadas a momentos en donde las Bombas Abel se encontraban fuera de operación por estar en funcionamiento los otros Sistemas de Bombeo. Además, por sus altas horas acumuladas, afectan los cálculos no logrando tener un análisis certero.

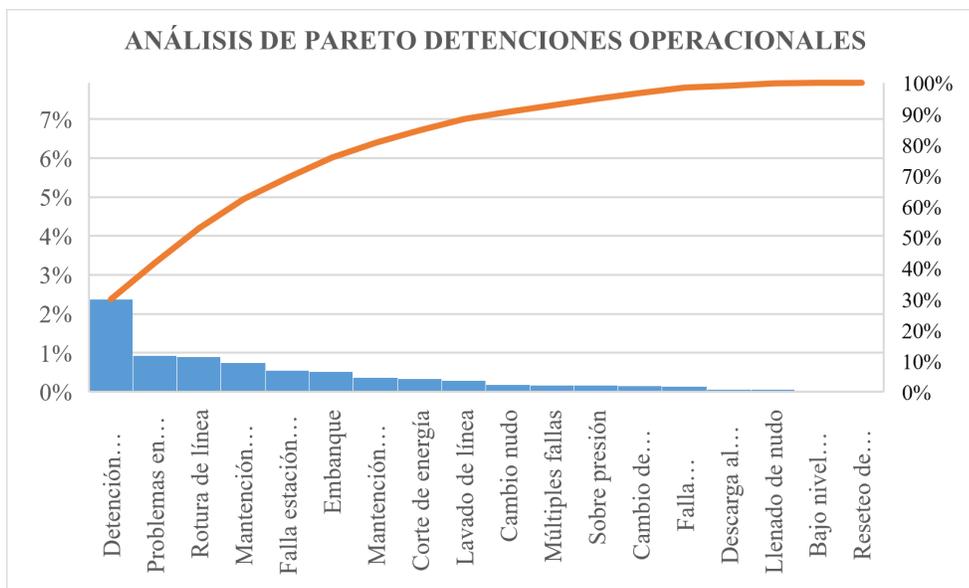


Figura 4.13: Análisis de Pareto para Detenciones operacionales, Sistema Abel.

Por otro lado, y continuando con los Tipos de detenciones, en la siguiente Tabla 4.18 se exponen detalladamente las Detenciones MNP:

Tabla 4.18: Modos de falla para Detenciones MNP, Sistema Abel.

<b>Detenciones MNP</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Horas totales</b>
Saturación de filtro	18	83,33
Baja eficiencia	10	67,00
Falla depósito aceite	12	58,32
Baja presión	7	45,07
Multiples fallas	8	36,91
Fallas Bombas	6	29,49
Cambio de piezas	3	20,25
Falla válvula	3	20,00
Bajo nivel de cámaras	2	17,83
Pérdida de carga	2	15,50
Falla variador bomba 1	1	12,16
Rotura de línea	4	11,16
Rotura caja depósito 4	1	7,16
Componentes eléctricos	3	6,67
Rotura de cámara	2	6,50
Falla sensor	3	6,33
Falla unidad hidráulica	1	6,00
Bajo nivel depósito aceite	7	5,50
Falla motor	1	4,50
Falla cámara	1	4,00

De esta Tabla se extrae que las detenciones causadas por Saturación de filtro son las más influyentes en las Bombas Abel, incidiendo en el 2,28 % de las horas totales de funcionamiento. Así, para representar esta información gráficamente y visualizar las detenciones con mayor repercusión en la operación de las bombas, se procede con la realización de Diagrama de Pareto, obteniendo el siguiente resultado representado en la Figura 4.14.

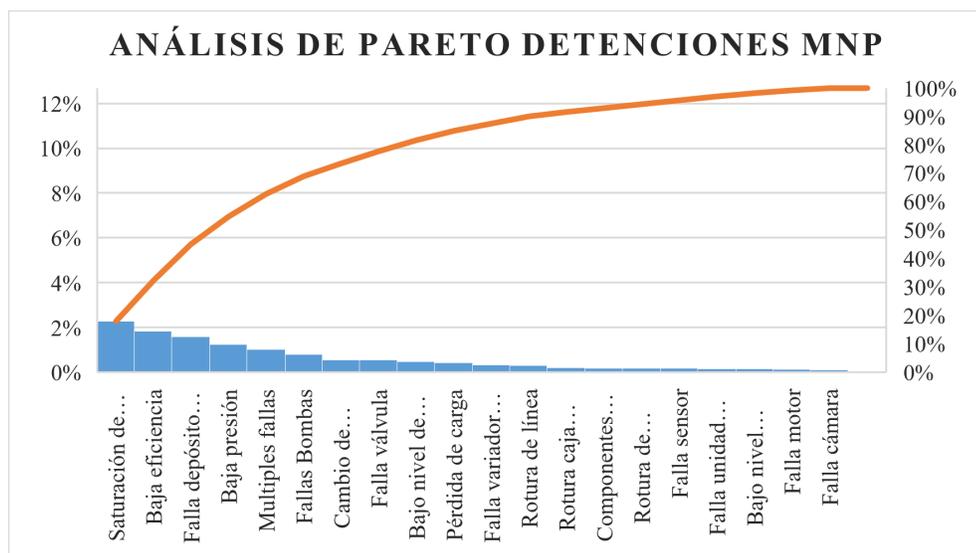


Figura 4.14: Análisis de Pareto para detenciones MNP, Sistema Abel.

Del gráfico se deduce que el 80 % del tiempo detenido por Detenciones MNP son generadas por el 40 % de los modos de falla que se describen a continuación:

- **Saturación de filtro:** Detenciones provocadas por filtros saturados de arenas.
- **Baja eficiencia:** Detenciones provocadas por baja eficiencia durante el funcionamiento de las bombas.
- **Falla depósito de aceite:** Fallas provocadas en el depósito de aceite de las bombas.
- **Baja presión:** Detenciones provocadas por baja presión de las bombas durante el funcionamiento de estas.
- **Múltiples fallas:** Detenciones provocadas por múltiples fallas no especificadas en las bombas.
- **Falla bombas:** Detenciones provocadas por diversas fallas de origen mecánico en las bombas de precarga al Sistema Abel.
- **Cambio de piezas:** Detenciones provocadas por cambios de piezas mecánicas de la bomba.
- **Falla válvula:** Detenciones provocadas por diversas fallas mecánicas en las válvulas.

Así, se obtienen las 8 detenciones MNP que más afectan a las Bombas Abel. Sin embargo, en la Tabla presentada se pueden contar que existen 12 modos de fallas adicionales a los descritos y que no toman relevancia en el Análisis de Pareto. Si existiese una mejor clasificación en torno al origen real de las detenciones, la cantidad de modos de falla serían menor y los gráficos de Pareto más eficientes para su análisis.

Finalmente, en la siguiente Tabla 4.19, se presentan los modos de falla para Detenciones MP. Como solo predomina las Mantenciones programadas a las Bombas Abel, no se realiza Diagrama de Pareto en este caso.

Tabla 4.19: Modos de falla para Detenciones MP, Sistema Abel.

Detenciones MP	Cantidad	Horas acumuladas
Mantención Bombas Abel	10	84,50

#### 4.2.2.2. Indicadores de mantenimiento

Luego de determinar los modos de falla que más afectan a la continuidad operativa de las Bombas Abel, se procede a cuantificar indicadores de mantenimiento que apoyen el estudio de su comportamiento. Para este cálculo se utiliza la estadística mensual de fallas en el sistema. Esta información se puede encontrar en la Tabla B.2 ubicada en Anexos, ya que no se tratará directamente en este trabajo.

Se comienza con el cálculo del KPI Mean Between Failure (MTBF) con la información mensual disponible en la Tabla B.4. Para privilegiar los datos críticos, en la Tabla 4.20 se muestran los meses en que el MTBF tuvo el valor más alto.

Tabla 4.20: Información mensual KPI's de mantenimiento puntos críticos, MTBF.

Meses	Horas funcionamiento	Horas detenidas	Fallas	MTBF
oct-20	7	42	9	0,72
sept-21	11	36	5	2,10
nov-21	1	0	1	1,00

Así, se destaca el mes de octubre 2020, donde se obtiene el menor MTBF de 0,72 horas, indicando que, en promedio, cada 45 minutos se produce una detención. Luego, continuando con los meses de noviembre 2021, para terminar con septiembre 2021 con un MTBF de 2,10 horas,

Estos datos se visualizan gráficamente en la Figura 4.15, donde se distinguen los puntos más bajos como los críticos definidos anteriormente. Luego de esto, la mayoría se los meses se encuentran cercanos, o sobre, las 30 horas. De todas maneras, el mayor MTBF registrado es para agosto 2020 con 67,67 [hrs]. Contrariamente a esto, marzo 2021 es el mes con mayor cantidad de arena movida, pero obteniendo un MTBF más bajo de 56,02 [hrs]. Aún así, los valores del MTBF registrados para este sistema no indican un buen desempeño de las bombas, ya que en el mejor de los casos, ocurren fallas cada 2 días y 19 horas.

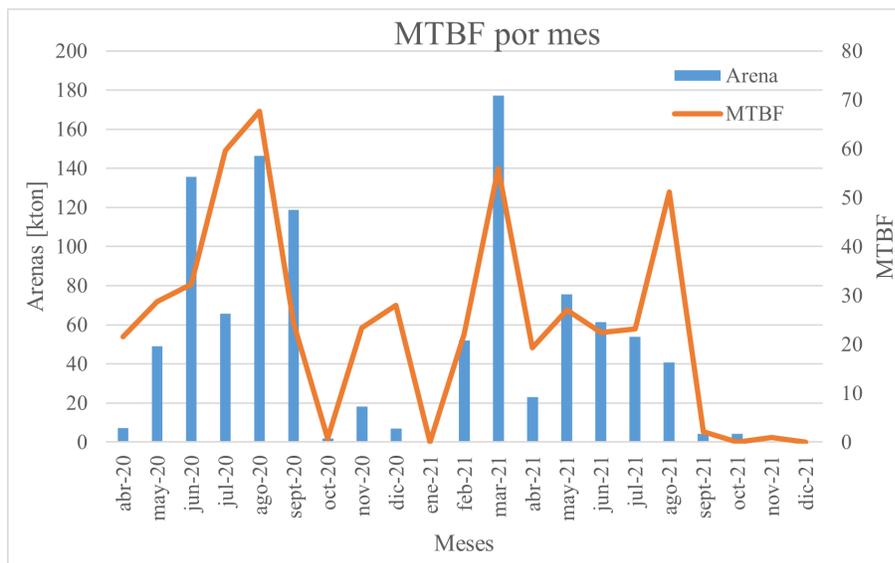


Figura 4.15: Valores mensuales de MTBF vs Arenas depositadas, Sistema Abel.

Por otro lado, se calcula el KPI Mean Time to Repair (MTTR) con la información disponible en la Tabla B.4. Al igual que en el caso anterior, en la Tabla 4.21 se exponen los meses en que el valor del MTTR es el más alto en comparación al resto de la información.

Tabla 4.21: Información mensual KPI's de mantenimiento puntos críticos, MTTR, Sistema Abel.

Meses	Horas funcionamiento	Horas detenidas	Fallas	MTTR
dic-20	28	7	1	7,00
abr-21	58	25	3	8,17
ago-21	102	16	2	8,08
sept-21	10,5	36	5	7,20

Según estos datos, se destaca el mes de abril 2021, con 8,17 [hrs] para el valor de MTTR. Luego, siguen en forma descendente los meses de agosto 2021, septiembre 2021 y para terminar el mes de diciembre 2020, con un MTTR de 7 [hrs].

Para visualizar gráficamente estos datos, se presenta la Figura 4.16 en la cual se distinguen los cuatro peaks más altos del MTTR. Además, se logra dar cuenta que no hay una estabilidad del valor del indicador, no pudiendo obtener una relación con la arena movida.

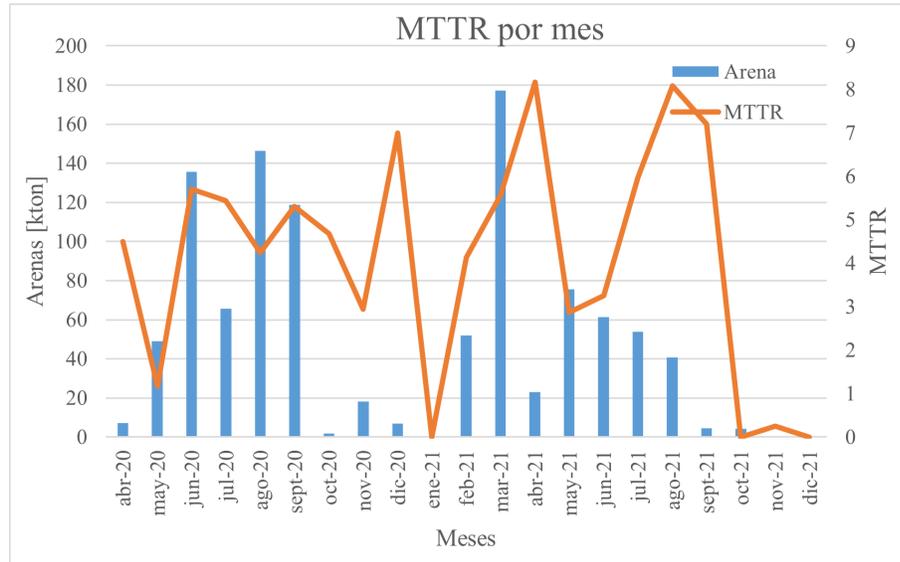


Figura 4.16: Valores mensuales de MTTR vs Arenas depositadas, Sistema Abel.

### 4.3. Detector de anomalías

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para el Diagnóstico y Pronóstico como parte del desarrollo del Detector de Anomalías. Es importante destacar que debido a los requerimientos de esta herramienta, se utilizan distintos rangos de fecha de información para cada sistema a los definidos en el inicio de la sección 4.2. A continuación se detallan las fechas de inicio y término para cada sistema:

- **Sistema Ash:** Desde 19 de mayo del 2021 hasta 28 de febrero 2022.
- **Sistema Abel:** Desde 15 de septiembre de 2020 hasta 10 de noviembre 2021.

Antes de entrenar los modelos basados en datos, ambos conjunto de datos se preparan por separado utilizando la metodología de preprocesamiento que se presenta en la sección 2.6.1. Este procesamiento es similar para Diagnóstico y Pronóstico, solo difieren del último paso el cual será explicado en las siguientes secciones.

También es importante decir que para la selección de la arquitectura final para cada sistema de estudio fue realizando variadas pruebas y combinaciones con lo definido en metodología. Así se seleccionó la mejor combinación de redes neuronales, función de activación y cantidad de capas y neuronas por capas de acuerdo a la exactitud de la clasificación y pronóstico y a la curva ROC obtenida, priorizando aquellos valores AUC cercanos a 1 y una matriz de confusión con los valores más cercanos a 1 en su resultado, manteniendo una similitud entre ambos estados en estudio. Por lo tanto, a continuación se presentarán los resultados de las mejores combinaciones de arquitectura resultantes.

### 4.3.1. Detector de anomalías - Bombas Ash

#### 4.3.1.1. Preprocesamiento

Se obtienen solo dos sensores con registro de datos para las Bombas Ash: sensores que miden el flujo final del sistema de bombeo, que va directo hacia el muro del tranque, y un sensor que mide la densidad del flujo que se transporta. Es por esto que el proceso de selección y reducción de sensores no se aplicó para este caso, por lo que se trabajan con ambos registros.

Así, en primer lugar, se comienza con la eliminación de valores nulos de los sensores. Estos corresponden a momentos de error de lectura del sensor y la cantidad varía en cada uno. La Tabla 4.22 indica la cantidad y proporción del total de estos valores nulos.

Tabla 4.22: Cantidad de valores nulos para Bombas Ash.

Sensor	Valores nulos	Porcentaje
Flujo	570	0,10 %
Densidad	34257	8,30 %

A continuación, se verifica que no haya duplicidad en las fechas de registro y que todas sean linealmente temporales, es decir, que la fecha de inicio siempre sea menor a la fecha de término. Con esto, se vuelve a realizar una limpieza de los datos. Sumado a esto, se baja la tasa de muestreo a 5 minutos. El resultado se presenta en la Figura 4.17, donde los histogramas indican el rango de valores registrado por cada sensor. Además, en la Tabla 4.23 se detalla la información aritmética de los sensores.

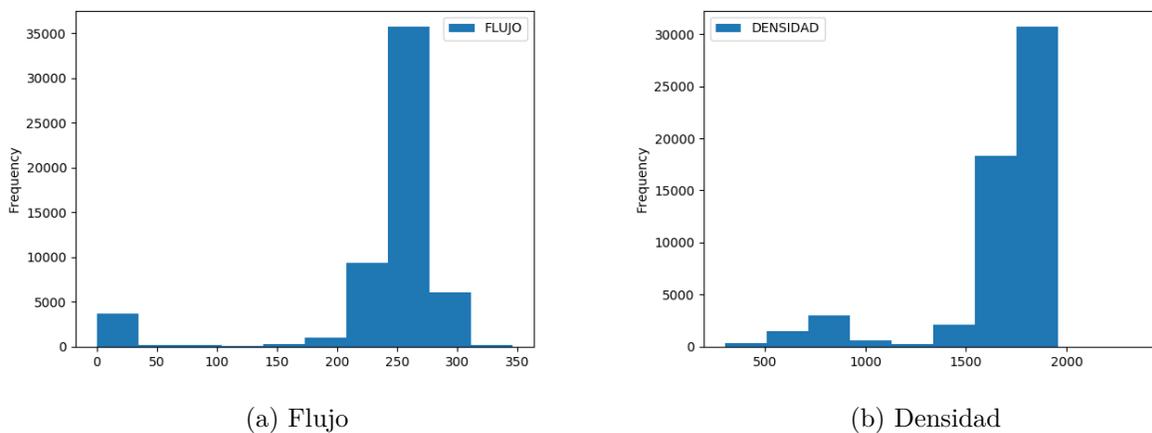


Figura 4.17: Histogramas de sensores Sistema Ash.

Tabla 4.23: Valores aritméticos para sensores, Bombas Ash.

Sensor	Cantidad	Media	Desviación std	Valor min	Valor max
Flujo	56915	238,6	67,8	0,0	346,4
Densidad	56915	1657,9	316,8	301,0	2374,1

De aquí se obtiene que mayoritariamente los valores para el Flujo se concentran mayoritariamente entre los 200 y 300 [m<sup>3</sup>/hr] y para la Densidad, estos se concentran mayoritariamente entre los 1500 y 2000. Según la Tabla, la media para el Flujo es 238,6 y para la Densidad es 1657,9, valores afectados por los registros bajos que existe para cada uno.

De manera paralela, los registros de mantenimiento se analizan para crear las etiquetas del estado de salud. Debido a la información que contiene este registro, se definen los intervalos de tiempo operativos y en detención. Así, a los intervalos de tiempo operativo se le asigna una etiqueta de *Normal*, a las detenciones operacionales y MP se le asigna una etiqueta de *Pausa* y a las detenciones MNP se les asigna la etiqueta de *Falla*. Dentro de los modos de falla etiquetados como *Falla*, se descartan todas aquellas detenciones relacionadas a problemas eléctricos como *Falla variador* y *Problemas con tarjeta PLC*.

Luego de la generación de etiquetas, estas se concatenan con la información de sensores, creando una nueva base de datos con la información etiquetada a una tasa de muestreo de 5 minutos. De esta base se eliminan los datos con etiquetas *Pausa*, y a las etiquetas *Normal* y *Falla* se le asignan los números 0 y 1 respectivamente. La cantidad final de datos con su respectiva etiqueta se presentan a continuación en la Tabla 4.24.

Tabla 4.24: Cantidad de etiquetas en total de data.

Estado	Cantidad	Porcentaje
Normal	55.312	97,2 %
Falla	1603	2,8 %

En resumen, se crean ventanas de tiempo distintas para cada análisis. En el caso de Diagnóstico, las ventanas de tiempo son de 30 minutos. En el caso del Pronóstico, las ventanas de tiempo diseñadas son de 60 minutos con el objetivo de predecir la condición 30 minutos a futuro. Así, el resultado es la data seccionada para los modelos del Detector de Anomalías, obteniendo una muestra para Entrenamiento y Testeo.

#### 4.3.1.2. Diagnóstico

El modelo de Diagnóstico tiene una arquitectura de un autoencoder de 2 capas de redes neuronales recurrentes simples [RNN], con 30 y 15 neuronas por capa, ambas definidas con una función de activación tanh. El modelo se entrenó por 200 épocas. Los resultados se visualizan a continuación en las Figuras 4.18 y 4.19 para la curva ROC y Matriz de confusión. Además, los parámetros resultantes de precisión del modelo se detallan en la Tabla 4.25.

Tabla 4.25: Parámetros de validación, Diagnóstico Bombas Ash.

	Precisión	Sensibilidad	F1
<b>Normal [0]</b>	0,90	0,86	0,87
<b>Falla [1]</b>	0,85	0,90	0,88
<b>Exactitud</b>	-	-	0,87

De acuerdo a estos resultados, la curva ROC posee un AUC de 0,89, valor cercano a 1 por lo que el modelo es considerado como un buen clasificador. En cuanto a la matriz de confusión, esta clasifica con un 84,8 % de precisión la clase normal, y con un 90,1 % de precisión la clase de falla, dando poco margen a los falsos positivos y falsos negativos. En cuanto al valor  $F_1$ , este alcanza los 0,87 para cada una de las categoría Normal, y 0,88 para la categoría Falla, valores cercanos a 1 dando indicios de que la precisión y la sensibilidad son altas y confiables.

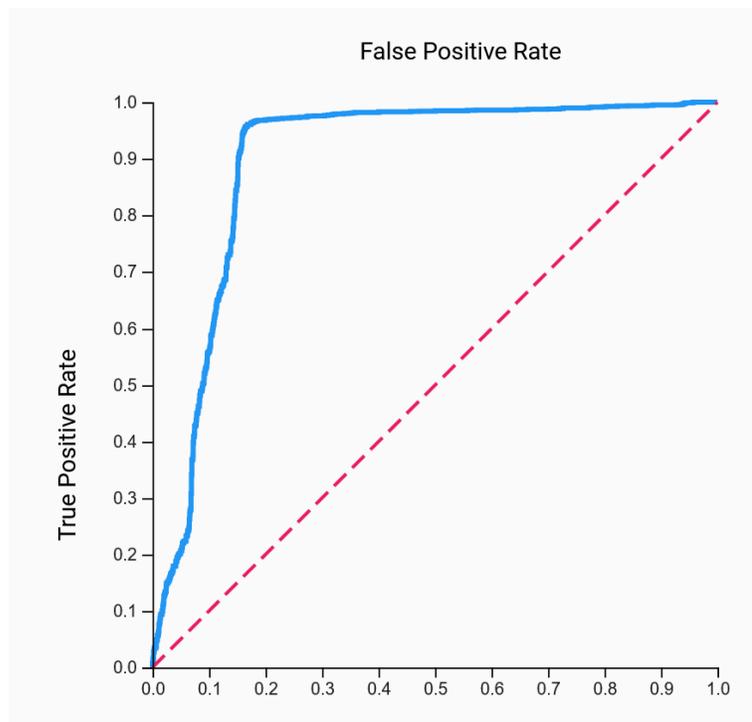


Figura 4.18: Curva ROC Diagnóstico Bombas Ash.

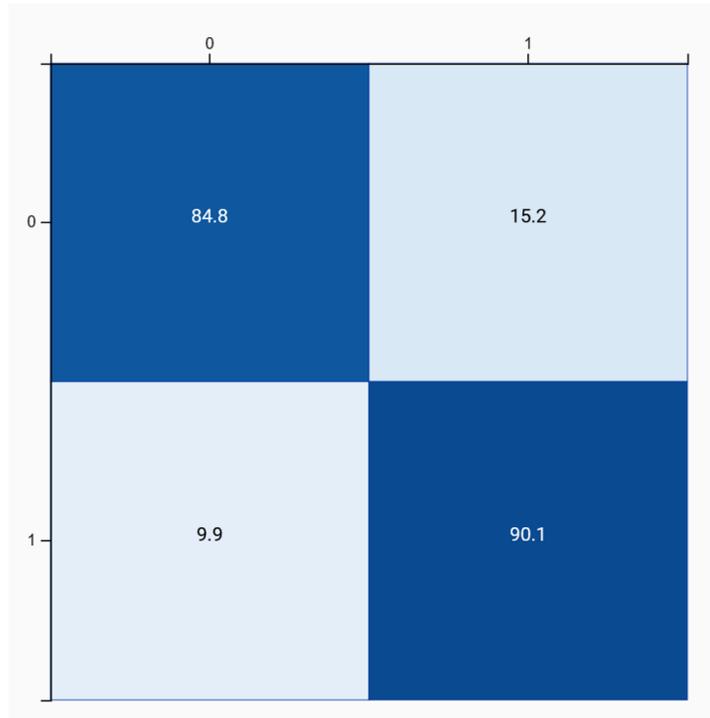


Figura 4.19: Matriz de confusión Diagnóstico Bombas Ash.

### 4.3.1.3. Pronóstico

El modelo de Pronóstico tiene una arquitectura de un autoencoder de 2 capas de redes neuronales recurrentes simples [RNN] bidireccionales, con 30 y 15 neuronas por capa, ambas definidas con una función de activación tanh. El modelo se entrenó por 40 épocas. Los resultados se visualizan a continuación en las Figuras 4.20 y 4.21 para la curva ROC y Matriz de confusión. Además, los parámetros de precisión del modelo se detallan en la Tabla 4.26.

Tabla 4.26: Parámetros de validación, Pronóstico Bombas Ash.

	Precisión	Sensibilidad	F1
<b>Normal [0]</b>	0,88	0,74	0,8
<b>Falla [1]</b>	0,77	0,9	0,83
<b>Exactitud</b>	-	-	0,82

De acuerdo a estos resultados, la curva ROC posee un AUC de 0,83, valor relativamente cercano a 1 y mayor a 0,8, por lo que es considerado como un modelo con buen pronóstico. En cuanto a la matriz de confusión, esta pronostica con un 79,3 % de los datos normales como normales, pero posee una tasa del 20,7 % de pronóstico erróneo para datos falsos negativos. Luego, pronostica con un 82,1 % de los falla como falla, presentando una tasa del 17,9 % para pronóstico de falsos positivos. Todo esto en una ventana de tiempo futura de 30 minutos. Finalmente el valor de  $F_1$  alcanza los 0,80 para la categoría Normal, y 0,83 para la categoría Falla, mostrando una mayor certeza para el pronóstico de las Fallas que los estados normales.

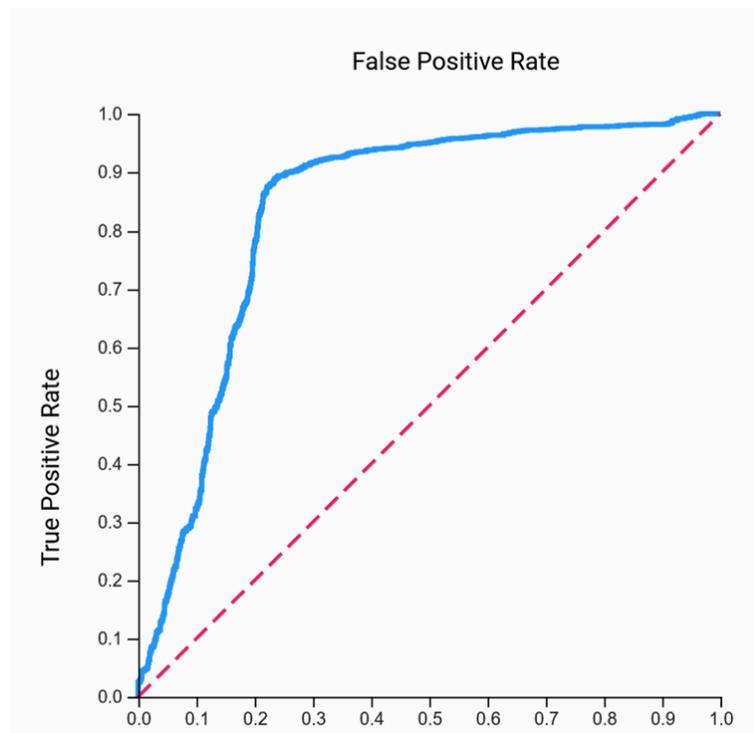


Figura 4.20: Curva ROC Pronóstico Bombas Ash.

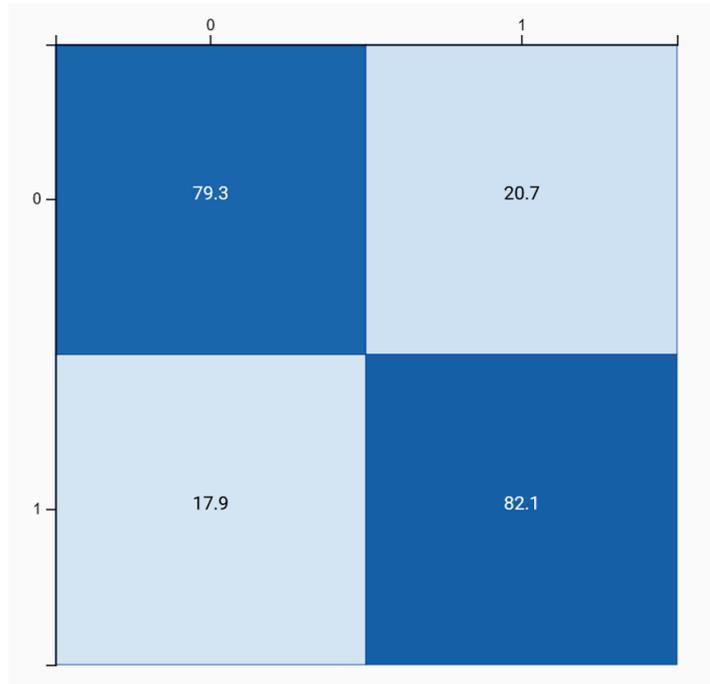
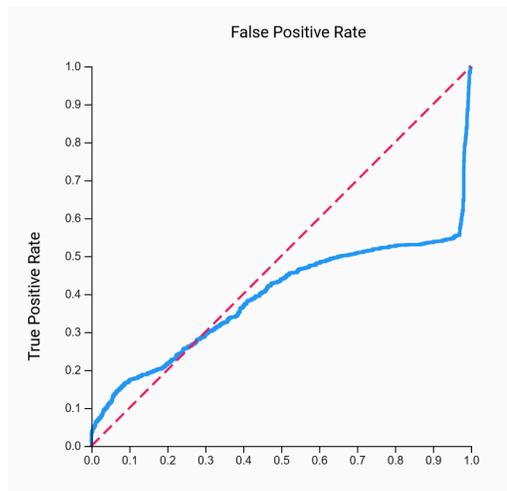
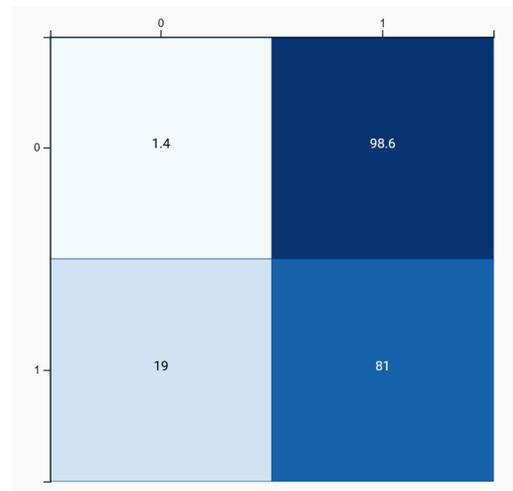


Figura 4.21: Matriz de confusión Pronóstico Bombas Ash.

Como bien se describió en la etapa de preprocesamiento, los resultados anteriores se realizaron para una ventana de tiempo a futuro de 30 minutos. Para evaluar el desempeño del modelo a un mayor tiempo de pronóstico, se prueba la misma arquitectura a una ventana de tiempo mayor de 180 minutos. Los resultados de esta prueba se muestran a continuación en la Figura 4.22.



(a) Curva ROC Diagnóstico, Bombas Ash.



(b) Matriz de confusión Diagnóstico, Bombas Ash.

Figura 4.22: Resultados de pronóstico a 180 minutos al futuro.

De acuerdo a estos resultados, al aumentar el pronóstico en 6 veces, llegando a los 180 minutos para este caso, la curva ROC posee un AUC de 0,39. Este valor indica que el

pronóstico no presenta buenos resultados, por lo tanto no es de fiar. Luego, la matriz de confusión pronostica con un 1,4 % de los datos normales como normales y un 98,6 % de falsos negativos. Para el caso del estado de falla, pronostica con un 81 % de falla como falla y con un 19 % de falsos positivos. Finalmente el valor  $F_1$  alcanza los 0,02 para categoría Normal y 0,58 para Falla. Los resultados de parámetros de validación se encuentran en la Tabla 4.27.

Comparando ambos resultados se deduce que el modelo como tal no posee buen rendimiento para pronosticar eventos no deseados a ventana de tiempos mayores. Esto puede verse afectado por la calidad de los datos existentes, ya que para este sistema solo se trabajó con 2 bases de datos de monitoreo más la etiqueta de cada uno.

Tabla 4.27: Parámetros de validación, Pronóstico de prueba Bombas Ash.

	Precisión	Sensibilidad	F1
<b>Normal [0]</b>	0,07	0,01	0,02
<b>Falla [1]</b>	0,45	0,81	0,58
<b>Exactitud</b>	-	-	0,41

## 4.3.2. Detector de anomalías - Bombas Abel

### 4.3.2.1. Preprocesamiento

La etapa de preprocesamiento para las Bombas Abel difiere en un paso al caso anterior. Primero se parte con los sensores de registro de datos. En este caso se cuenta con registros de sensores para cada bomba por separado, por lo que para la Bomba 1 se obtienen los sensores de RPM, Flujo, Presión de succión y descarga. Luego, como para las bombas 2 y 3 no poseen un funcionamiento continuo durante el periodo, pero ambas se complementan por los periodos que hay registro de información, los siguientes cuatro sensores de RPM, Flujo, Presión de succión y descarga se construyen con datos de las Bombas 2 y 3.

Así, se parte con la eliminación de valores nulos los cuales se identifican, para cada sensor, en la Tabla 4.28. Acá se observa que ninguno sobrepasa del 0,5 % de información perdida, por lo que se procede con la eliminación de la fila. Luego, se revisan las fechas duplicadas, seguido de verificar que todas las fechas iniciales sean menor a las fechas de término.

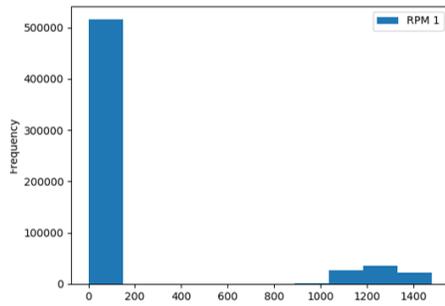
Tabla 4.28: Valores nulos para cada sensor, Bombas Abel.

Sensor	Valores nulos	Porcentaje
RPM 1	3.031	0,5 %
Flujo 1	3.033	0,5 %
Presión succión 1	3.033	0,5 %
Presión descarga 1	3.033	0,5 %
RPM 4	3.028	0,5 %
Flujo 4	3.035	0,5 %
Presión succión 4	3.028	0,5 %
Presión descarga 4	3.028	0,5 %

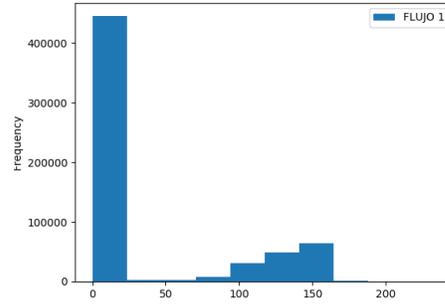
De esta manera se obtienen los Histogramas de la Figura 4.23, donde se identifican los intervalos de registro de datos. Además, la Tabla 4.29 detalla la información aritmética de los sensores.

Tabla 4.29: Datos aritméticos de la data de sensores, Bombas Abel.

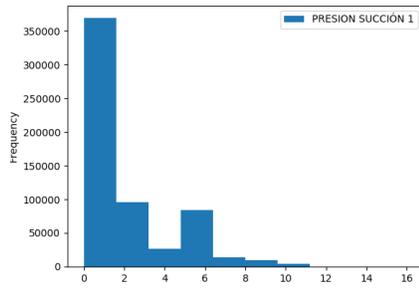
Sensor	Cantidad	Media	Desviación std	Valor min	Valor max
RPM 1	603.136	179,4	439,7	0,0	1.480,2
Flujo 1	603.136	34,1	58,3	0,0	235,1
Presión succión 1	603.136	1,9	2,4	0,0	16,0
Presión descarga 1	603.136	3,0	4,2	0,0	29,0
RPM 4	603.136	147,4	403,9	0,0	1.481,0
Flujo 4	603.136	43,9	66,9	0,0	266,0
Presión succión 4	603.136	1,1	1,9	0,0	16,0
Presión descarga 4	603.136	1,5	3,3	0,0	23,6



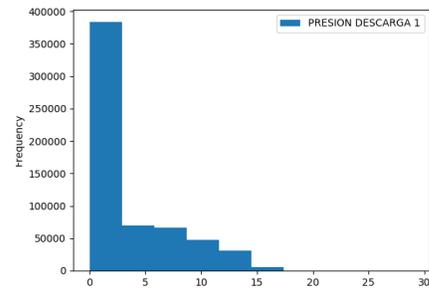
(a) RPM 1



(b) Flujo 1

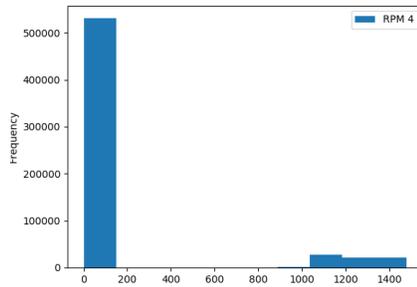


(c) Presión succión 1

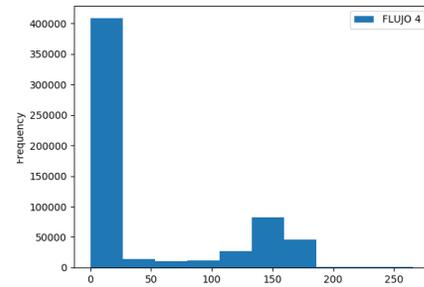


(d) Presión descarga 1

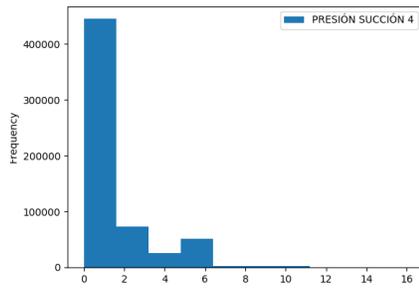
Figura 4.23: Histogramas de sensores Bomba 1 Abel.



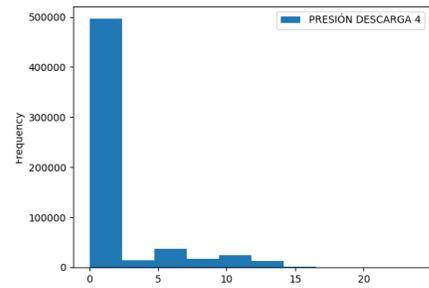
(a) RPM 4



(b) Flujo 4



(c) Presión succión 4



(d) Presión descarga 1

Figura 4.24: Histogramas de sensores construidos con Bomba 2 y 3 Abel.

Como hay información para ocho sensores, se realiza una Matriz de Correlación en la Figura 4.25, para evaluar reducir parámetros y costo computacional bajo el parámetro que se eliminarán aquellas variables con correlaciones mayor al 0,85.

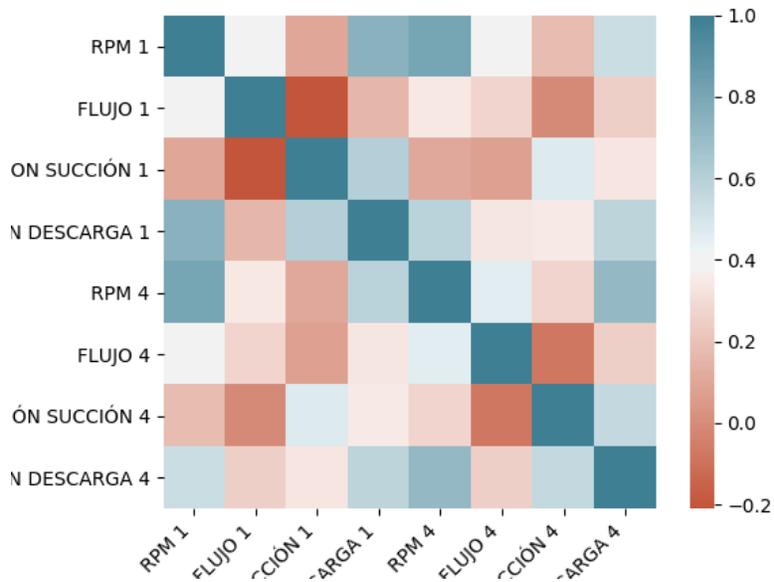


Figura 4.25: Matriz de correlación entre sensores Sistema Abel.

Como el resultado no es favorable, ya que bajo este criterio solo se pueden eliminar 2 variables con correlaciones cercanas a 1, se procede con la realización de PCA sobre los ocho sensores originales. Para seleccionar las dimensiones necesarias se calcula la varianza acumulada por cada componente principal, la cual se ve en la siguiente Figura 4.26:

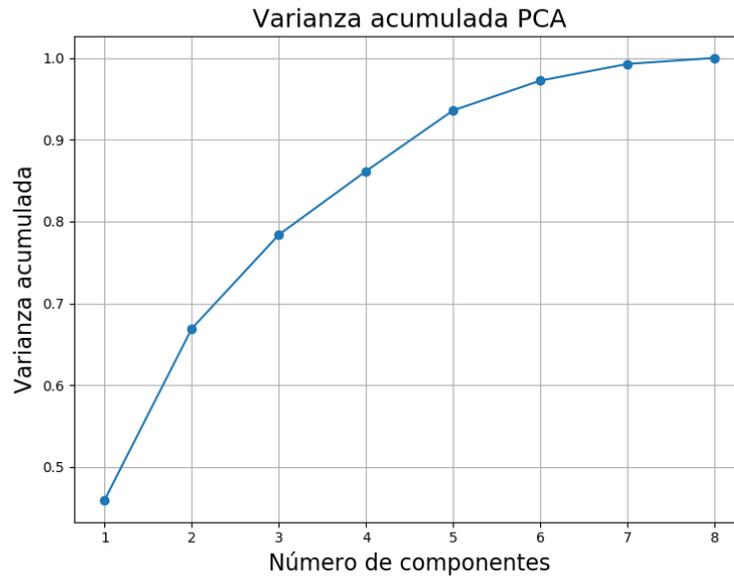


Figura 4.26: Gráfico de varianza acumulada para PCA, Sistema Ash.

Tabla 4.30: Varianza acumulada PCA, Bombas Abel.

Nº de componentes	Varianza acumulada
1	0,46
2	0,67
3	0,78
4	0,86
5	0,93
6	0,97
7	0,99
8	1,00

De este gráfico se extrae que con 4 componentes principales se obtiene el 86 % de la varianza acumulada. Por lo tanto se seleccionan las 4 primeras componentes del PCA.

En cuanto a los registros de mantenimiento, se siguen los mismos pasos descritos en la sección 4.3.1.1 para la generación de etiquetas del estado de salud. Dentro de los modos de falla etiquetados como Falla, se descartan a todas aquellas detenciones relacionadas a problemas eléctricos como Fallas de sensor, Componentes eléctricos y Fallas de variador. Luego, estas etiquetas se concatenan con la data de sensores para crear un registro etiquetado de la información con una tasa de muestreo de 1 minuto. La cantidad final obtenida de Pausas y Fallas se detallan en la Tabla 4.31.

Tabla 4.31: Cantidad de etiquetas en total de data.

Sensor	Valores nulos	Porcentaje
Normal	104077	90,8 %
Falla	10569	9,2 %

Finalmente, se crean las ventanas de tiempo distintas para cada análisis. En el caso de Diagnóstico, las ventanas de tiempo son de 10 minutos. En el caso de Pronóstico, las ventanas de tiempo diseñadas son de 120 minutos, con 60 minutos a futuro para su predicción. Así, el resultado es la data seccionada para los modelos del Detector de Anomalías, obteniendo una muestra para Entrenamiento y Testeo.

#### 4.3.2.2. Diagnóstico

El modelo de Diagnóstico tiene una arquitectura de un autoencoder de 2 capas de redes neuronales recurrentes simples [RNN], con 30 y 15 neuronas por capa, ambas definidas con una función de activación ReLU. El modelo se entrenó por 100 épocas. Los resultados se visualizan a continuación en las Figuras 4.27 y 4.28 para la curva ROC y Matriz de confusión. Además, los parámetros de precisión se detallan en la Tabla 4.32

Tabla 4.32: Parámetros de validación, Diagnóstico Bombas Abel.

	Precisión	Sensibilidad	F1
<b>Normal [0]</b>	0,98	0,95	0,96
<b>Falla [1]</b>	0,95	0,98	0,96
<b>Exactitud</b>	-	-	0,96

De acuerdo a estos resultados, la curva ROC posee un AUC de 0,98, valor muy cercano a 1 por lo que el modelo realiza pronósticos certeros de su data. En cuanto a la matriz de confusión, esta diagnostica con un 94,8% de precisión la clase normal, y con un 98% de precisión la clase de falla. Para el valor de F1, este alcanza los 0,96 para cada una de las categorías, dando una alta confiabilidad a los resultados obtenidos.

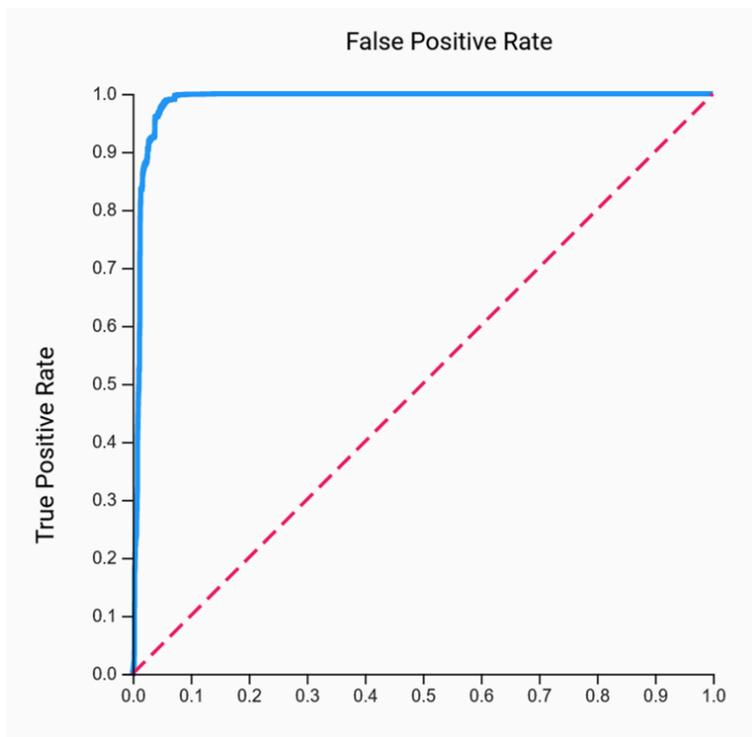


Figura 4.27: Curva ROC Diagnóstico Bombas Abel.

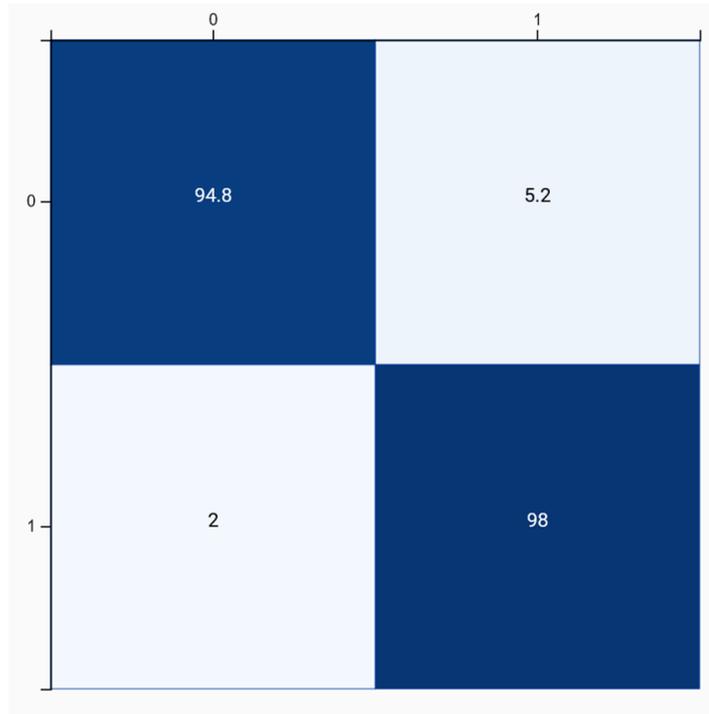


Figura 4.28: Matriz de confusión Diagnóstico Bombas Abel.

#### 4.3.2.3. Pronóstico

El modelo de Pronóstico tiene una arquitectura de un autoencoder de 2 capas de redes neuronales recurrentes LSTM, con 30 y 20 neuronas por capa, ambas definidas con una función de activación tanh. El modelo se entrenó por 20 épocas. Los resultados se visualizan a continuación en las Figuras 4.29 y 4.30 para la curva ROC y Matriz de confusión. Además, los parámetros de precisión del modelo se detallan en la Tabla 4.33

Tabla 4.33: Parámetros de validación, Pronóstico Bombas Abel.

	Precisión	Sensibilidad	F1
<b>Normal [0]</b>	0,91	0,92	0,92
<b>Falla [1]</b>	0,92	0,91	0,92
<b>Exactitud</b>	-	-	0,92

De acuerdo a los resultados, la curva ROC posee un AUC de 0,91, valor similar a 1 por lo que se considera un pronóstico con buenos resultados. En cuanto a la matriz de confusión, esta pronostica con un 92 % los datos normales como normales, pero posee una tasa del 8 % de pronóstico erróneo para datos falsos negativos. Luego, pronostica con un 91,4 % de las falla como falla, presentando una tasa del 8,6 % para pronóstico de falsos negativos. Todo esto en una ventana de tiempo futura de 60 minutos. Finalmente el valor de  $F_1$  alcanza los 0,92 para todas las categorías, mostrando una mayor confiabilidad de los datos pronosticados.

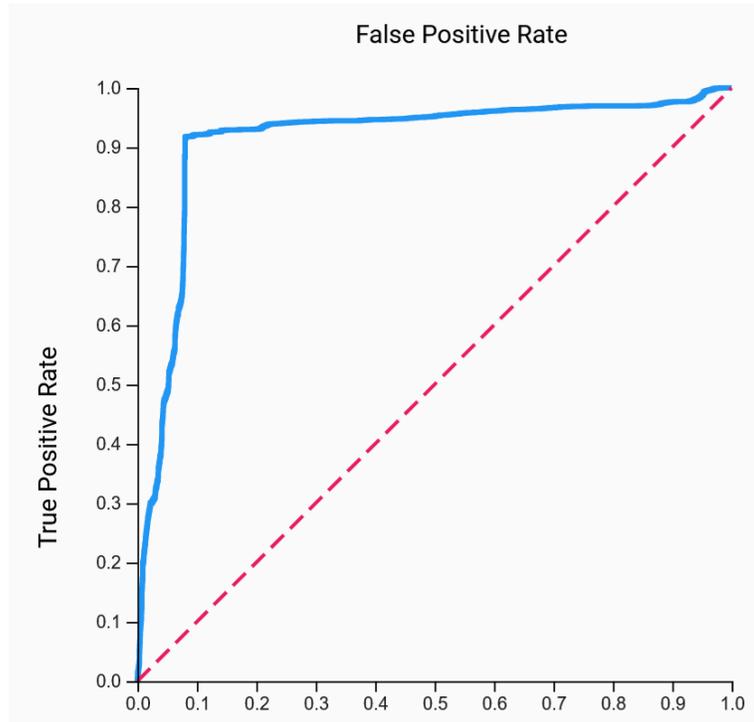


Figura 4.29: Curva ROC Pronóstico Bombas Abel.

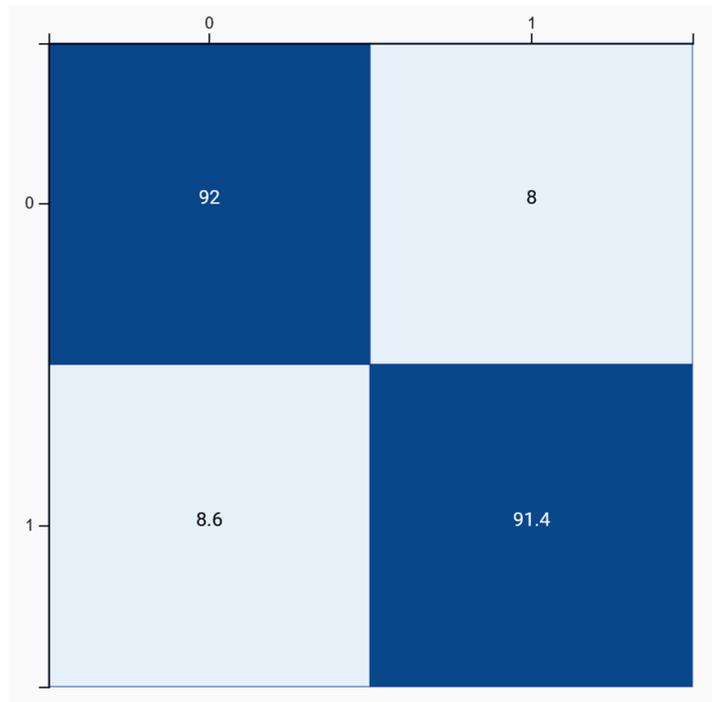


Figura 4.30: Matriz de confusión Pronóstico Bombas Abel.

Como bien se describió en la etapa de preprocesamiento, los resultados anteriores se realizaron para una ventana de tiempo a futuro de 120 minutos. Para evaluar el desempeño del modelo a un mayor tiempo de pronóstico, se prueba la misma arquitectura a una ventana de

tiempo mayor de 180 minutos. Los resultados se muestran a continuación en la Figura 4.31.

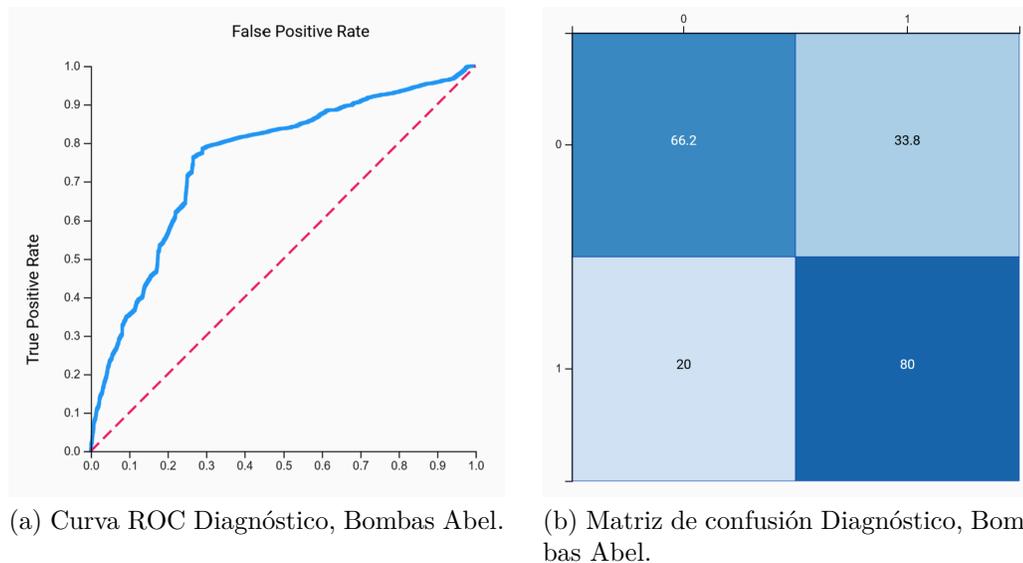


Figura 4.31: Resultados de pronóstico a 180 minutos al futuro.

De acuerdo a estos resultados, al aumentar el tiempo de pronóstico en 6 veces, llegando a los 180 minutos, la curva ROC posee un AUC de 0,75. Este valor baja en comparación al resultado anterior, pero sigue manteniéndose cercano a 0,8, por lo que el valor puede considerarse como regular. En cuanto a la matriz de confusión, esta pronostica con un 66,2% de los datos normales como normales, pero posee una tasa del 33,8% de pronóstico erróneo para los datos falsos negativos. Luego, pronostica con un 80% de falla como falla y presenta una tasa del 20% para pronóstico de falsos positivos. Finalmente el valor de F1 alcanza los 0,71 para la categoría Normal y 0,75 para la categoría Falla, mostrando una mayor certeza de los resultados para la Falla. Estos valores pueden verse en la Tabla 4.34.

Comparando ambos resultados se deduce que el modelo posee buen rendimiento al aumentar el tiempo de pronóstico, lo cual no asegura que se mantenga al aumentar aun más la ventana de tiempo para esto. De todas maneras este modelo posee grandes cantidades de datos de monitoreo, por lo que si este registro fuese más extenso en el tiempo, el rendimiento podría ser mejor.

Tabla 4.34: Parámetros de validación, Pronóstico de prueba Bombas Abel.

	Precisión	Sensibilidad	F1
<b>Normal [0]</b>	0,77	0,66	0,71
<b>Falla [1]</b>	0,70	0,80	0,75
<b>Exactitud</b>	-	-	0,73

## 4.4. Mejoras técnicas

De acuerdo a lo estudiado en las secciones 4.2 y 4.3, se distinguen grandes modos de falla que afectan el funcionamiento para las Bombas Ash y Bombas Abel. Para ambos casos, las detenciones por Molino SAG son las que más perjudican la continuidad operativa, abarcando casi el 10 % del tiempo detenido solo por problemas asociados a este equipo. Sin embargo, como el Molino SAG pertenece al área de Molienda, etapa previa a la generación, transporte y clasificación de relaves, no está relacionado directamente con los Sistemas de distribución de Arenas del Tranque. Es por esto que buscar mejoras técnicas para disminuir este tipo de detención no está dentro de los alcances de este trabajo.

Adicional a lo anterior, también para ambos tipos de bombas se presentan las detenciones por mantención de la Estación de ciclones y por diversas fallas de la misma. Estas detenciones abarcan casi el 8 % del tiempo detenido, impactando en menor manera que las detenciones por Molino SAG, pero sumando una cantidad importante de horas que afectan la continuidad de funcionamiento de las bombas. Sin embargo, como la estación de cicloneo, que está compuesta por Hidrociclones, harnero y estanque agitador, pertenece a la etapa de clasificación de relaves, previa al transporte de arenas, todas las fallas ocasionadas en esta sección no están relacionados con el Sistema de distribución de Arenas del Tranque. Es por esto que buscar mejoras técnicas para disminuir este tipo de problemas no está dentro de los alcances de mejoras técnicas.

A fin de cuentas, dentro de los modos de falla seleccionados en los Análisis de Pareto, y excluyendo los que se describen anteriormente, se tienen los problemas asociados a Roturas de Línea, Problemas de Flujo, Embanques, Saturación de filtros y problemas mecánicos de cada bomba. Además, con el desarrollo y los resultados del Detector de Anomalías, se evidencia que, con la poca información disponible, esta tecnología tiene potencial para el pronóstico de eventos. Así, a continuación se presentan las mejoras técnicas que tienen mayor potencial para cada sistema, con enfoque de dar mayor supervisión a la operación y posterior disminución de sus fallas asociadas.

### 4.4.1. Mejoras técnicas Sistema Ash

Dentro de los modos de falla más importantes para este sistema de bombas, se tienen las detenciones: Rotura de Línea (para fallas operacionales y fallas MNP), Problemas en flujo, Embanques y diversos problemas mecánicos intrínsecos la bomba. Esto se resume en la siguiente Tabla 4.35:

Tabla 4.35: Acumulado horas para modos de falla destacados, Bombas Ash

Detenciones	Horas totales	% del total
Detenciones Op.	2725,58	14 %
Modos fallas mecánicas	472,86	2 %

En esta Tabla se agrupan los modos de falla dependiendo de su origen. Así se da cuenta que, mayoritariamente las detenciones por problemas operacionales afectan en el 14% del tiempo total de funcionamiento de las bombas. Centrándose en esto, las fallas operacionales están altamente relacionadas, ya que los problemas que hay en el flujo que mueven las bombas ocasionan los embanques en las líneas y en los nudos. Luego, esto se relaciona con las Roturas de Líneas, ya que estas se provocan por dos motivos: fallas humanas al momento de desembancar las cañerías y por desgaste al transportar un flujo que, muchas veces, no es constante en sus parámetros.

Además, están las fallas mecánicas, integradas por los modos de falla resultante del análisis de Pareto, que afectan el 2% del tiempo total del funcionamiento de las bombas. Este valor es considerablemente menor en comparación a las detenciones operacionales. Centrándose en esto, las fallas por Roturas de línea se relacionan con problemas operacionales, provocadas en gran mayoría por gestaste del material. Luego, los Problemas de carga y Fallas de empaquetadura se relacionan entre sí ya que los problemas en la empaquetadura de las bombas provocan, en gran medida, problemas de carga en el sistema. En último lugar se tienen las fallas de roturas de válvulas, diversas fallas de bombas y fallas en manifold de las cuales no hay información detallada para asociarlas a una problemática.

En resumen, en cuanto a los resultados obtenidos por el Diagnóstico y Pronóstico del Detector de Anomalías, siendo capaz de diagnosticar con un 90,1% la clase de falla y pronosticar con un 82,1% a 30 minutos los eventos no deseados en la maquinaria, se desprende que es viable tener la posibilidad de pronosticar eventos no deseados en los sistemas de estudio con la información disponible en el momento. Si bien para este caso solo existía data de dos sensores por 9 meses, lo cual es considerado poco para este tipo de análisis, con una mayor inversión en monitorear parámetros y registrar la información de ellos será posible mejorar el pronóstico de eventos, siendo estos más certeros y con una mayor ventana de tiempo para su detección.

De esta manera, se logra identificar tres áreas con potencial para mejoras: Mayor monitoreo de los parámetros de las bombas, aumento de la disponibilidad de equipos y disminución de las fallas humanas al momento de realizar trabajos de reparación. Es por eso que, en base a este análisis, a continuación se describen las mejoras técnicas propuestas para cada ítem.

#### 4.4.1.1. Aumento de disponibilidad de equipos

Un aumento en la disponibilidad de equipos apunta a tener un nuevo tren de Bombas Ash en Stan-By, con el objetivo de utilizarlas cuando el tren de bombas principal se encuentre no disponible para su uso. Además, este nuevo tren de bombas solucionará el futuro problema al que se enfrentará la operación: transportar el relave desde la actual estación de bombas hasta una altura de 420,0 [m.s.n.m], lo que implica 10 metros adicionales a la actual altura del muro.

Así, para otorgar este aumento en la disponibilidad de equipos, se solicita al proveedor de las Bombas Ash, WEIR Minerals, una evaluación técnica sobre esta problemática, en el cual se analizará el desempeño actual de las bombas y su proyección a futuro para el transporte de arenas con las nuevas condiciones de operación. Para esto, WEIR Minerals solicita información relacionada a datos de operación de las bombas, tales como velocidades, presión, densidad del flujo, flujo y datos específicos de la pulpa de arena. Además, se solicitan planos de ubicación de la estación de bombas, ubicación de los nudos de descarga sobre el nudo y proyección a futuro de estos hasta el término para el año 2027.

A continuación, se presentarán las principales conclusiones del estudio realizado[22]:

1. En primer lugar, para las condiciones de operación, se concluye que las presiones máximas que alcanza el tren de bombas es de 14.1 [bar], esto ocurre cuando hay un aumento de sólidos o baja densidad de la pulpa. Luego, el 76 % del tiempo, el Sistema Ash opera con tres bombas en serie. Finalmente, las RPM de las bombas indican que trabajan entre un 70-80 % VDD.
2. En segundo lugar, y de acuerdo a las condiciones de operación y características de las Bombas Ash, se concluye que con el uso actual con tres bombas en serie, no se cumpliría con los futuros parámetros. Esto ya que, utilizando 3 bombas en serie y con los parámetros en su máximo valor registrado, solo se impulsaría arenas hasta el nudo 9, existiendo restricciones del motor actual y quedando el nudo 10 y el término del muro sin abastecimiento. Pero, bajo estas mismas condiciones y operando con cuatro bombas en serie, si se cumple con estos futuros parámetros del Tranque.
3. Por último se seleccionan cuatro bombas, idénticas a las actuales, para conformar este nuevo tren de bombas en Stand-By.

De esta manera, en la Figura 4.33 se presenta la disposición general del nuevo tren de bombas, con 4 unidades para su funcionamiento.

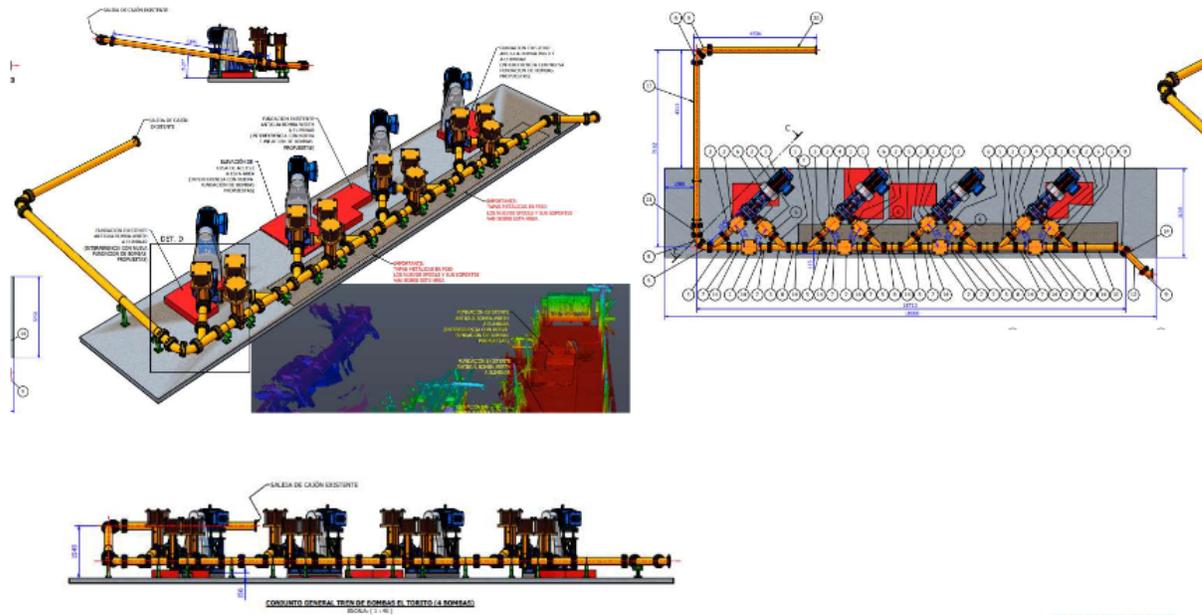


Figura 4.32: Nuevo tren de Bombas Ash con su disposición espacial[22]

#### 4.4.1.2. Aumento de monitoreo en parámetros operacionales

Un aumento de monitoreo apunta a realizar pequeños cambios del modo de operar las bombas. Actualmente, las bombas del Sistema Ash cuenta con monitoreo el línea de los parámetros Flujo línea pre-carga, Flujo del sistema, Presión del sistema y Densidad del sistema, datos que se ven en tiempo real en la Sala de Control del Tranque. Además, se monitorean las RPM de cada bomba.

Así, para este sistema se tiene que hay 5 indicadores que se monitorean en línea, pero de estos solo dos están registrados en la plataforma PI Processbook, donde queda guardada la información diaria hasta dos años de antigüedad, a una tasa de muestreo de 3 segundos. Los siguientes dos se monitorean en otra plataforma, la cual guarda la información diaria hasta tres meses de antigüedad a distintas tasas de muestreo, donde predomina cada 1 hora.

De esta manera, solo se puede acceder a un registro histórico de dos años del Flujo transportado y la densidad de este. En paralelo, solo se puede acceder a un registro de tres meses de las RPM de las bombas y la Potencia del sistema. Con esto, se identifica una deficiencia en información histórica disponible asociada al Sistema, ya que solo se puede acceder a data general, mayoritariamente relacionada al flujo transportado, y no un detallado por bomba. Además no existe un registro de parámetros mecánicos y eléctricos como: Potencia de cada bomba, Presiones de succión y descarga, Corriente y RPM con mayor tasa de muestreo.

Es por esto que se propone aumentar dicha información con los recursos ya existentes y utilizados por la empresa para

1. Creación y registro en PI Processbook de los TAG necesarios para el monitoreo de Potencia, Presiones, Corriente y RPM para cada bomba por separado.
2. Además, para cumplir con este mismo propósito para el nuevo tren de cuatro bombas, se debe incluir la instalación de sensores de monitoreo.

De este modo, se lograría tener un monitoreo en tiempo real de los parámetros de las bombas de impulsión de arenas, y así dar cuenta de los momentos en que se presente un problema, ya sea relacionado al flujo para prevenir las detenciones operacionales o mecánicas causadas por esto, o problemas mecánicos de la bomba. Además, se aumentaría la data monitoreada y con esto, se contaría con mayores recursos en caso de implementar el desarrollo del Detector de Anomalías, obteniendo resultados más certeros.

#### 4.4.2. Mejoras técnicas Sistema Abel

Dentro de los modos de falla más importantes para este sistema de bombas, se tienen las detenciones: Problemas en el flujo, Roturas de línea, Embanques, Saturación de filtro y diversos problemas mecánicos propios de cada bomba, que el detalle se puede revisar en la sección 4.2.2.1. Esto se resume en la siguiente Tabla 4.36:

Tabla 4.36: Acumulado horas para modos de falla destacados, Bombas Abel

Detenciones	Horas totales	% del total
Detenciones Op.	219,75	6 %
Modos fallas mecánicas	360,37	10 %

En esta Tabla se agrupan los modos de falla dependiendo de su origen. Así se da cuenta que, mayoritariamente, las detenciones por problemas mecánicos no programados afectan en el 10 % del tiempo total del funcionamiento de las bombas. Centrándose en esto, las fallas por saturación de filtro está altamente relacionado con los Problemas en el flujo de las detenciones operacionales. Transportar una pulpa de arena que no presenta condiciones constante entre sus propiedades provoca los Embanque de las líneas de transporte, Roturas de línea por desgaste del material y la saturación de los filtros de las bombas por no cumplir con la granulometría del flujo requerida. Además, entre los problemas mecánicos de las bombas, es probable que este los problemas del flujo sean causantes de alguno de ellos, como los cambios de piezas por desgaste que se puedan presentar. Para el resto de los modos de falla, no es posible asegurar con certeza la relación directa de este problema operacional con las fallas mecánicas.

Finalmente, en relación a los resultados de Diagnóstico y Pronóstico del Detector de Anomalías, se observa que esta herramienta fue capaz de diagnosticar con un 98 % de exactitud el estado de falla. En cuanto a la predicción, esta logra predecir con un 91,4 % de certeza que en 60 minutos ocurrirá un evento no deseado en la maquinaria. Si bien es un buen pronóstico,

es posible obtener mejores resultados de certeza, y a mayores ventanas de tiempo, con más información de monitoreo de los distintos parámetros físicos y eléctricos de la bomba.

Teniendo en cuenta estos antecedentes, a continuación se proponen las mejoras técnicas para mejorar la operación de las bombas:

1. En primer lugar, para solucionar la falla de la saturación de los filtros de las bombas, además de disminuir los problemas en el flujo transportado y desgaste de material, se concluye la necesidad de realizar un cambio de Harnero, equipo encargado de filtrar el material para su distribución a través de las bombas. De esta manera se logrará bajar la granulometría del flujo desde 8 [mm] a 5 [mm], cumpliendo con los parámetros de operación de las bombas[23].

Las características de este harnero proveído pro ERAL son las siguientes: Harnero modelo CV-75 con travesaños de succión cuadrada, con mayor momento de inercia y revestimientos de goma. Mallas de poliutero de luz cuadrada de 5 [mm]. Criba asociada a dos motovibradores de potencia total 212,2 [kW][23].

2. En segundo lugar, para solucionar los problemas de flujo y en gran parte las fallas mecánicas, se concluye la necesidad de implementar sistema de monitoreo en las bombas, con el fin de controlar a lo menos Presión y parámetros de caudal. De esta manera, se tendría un impacto positivo en las detenciones nombradas y permitiría trabajar monitoreando las bombas, dando el espacio para detectar mal funcionamiento y anticipándose a la falla.[24]

El sistema de monitoreo propuesto es el denominado iConSys, Intelligent Condition Pump Monitoring System, de los proveedores Tecfluid. Este sistema de monitoreo incluye componentes como sensores de presión, temperatura y posición de pistones, además del programa para realizar monitoreo en línea de los sensores. Así con esta herramienta se tendrán los datos operativos a simple vista, obteniendo indicadores de descaste o irregularidades, permitiendo planificaciones de mantenimiento e identificación prematura de eventos[24].

A continuación se visualiza un ejemplo de la interfaz de este sistema de monitoreo en línea:



Figura 4.33: Ejemplo de interfaz de monitoreo del sistema iConSys[24].

## 4.5. Evaluación económica

En la presente sección se cuantificará el ahorro total que se obtendría con la implementación de las mejoras técnicas propuestas en la sección anterior, con el fin de obtener indicadores de evaluación de proyectos que faciliten la toma de decisiones de inversión, descritos en la sección 2.7. Para esto, se comienza con el detalle de los costos de funcionamiento de ambos sistemas de bombas. Recordar que todos los valores serán presentados en la moneda *CoppCoin* [CC].

### 4.5.1. Gasto anual 2021

Comenzando en este punto, a continuación, en la Figura 4.34 y Tabla 4.37 se presenta el costo anual total de funcionamiento de los Sistemas Ash y Abel para el año 2021, el cual considera dentro costos totales las áreas de operación y mantención.

Tabla 4.37: Gasto anual para las Bombas de arenas en CC, año 2021.

Sistema Ash	Sistema Abel	Total año 2021
46.857,59	84.642,76	131.500,35

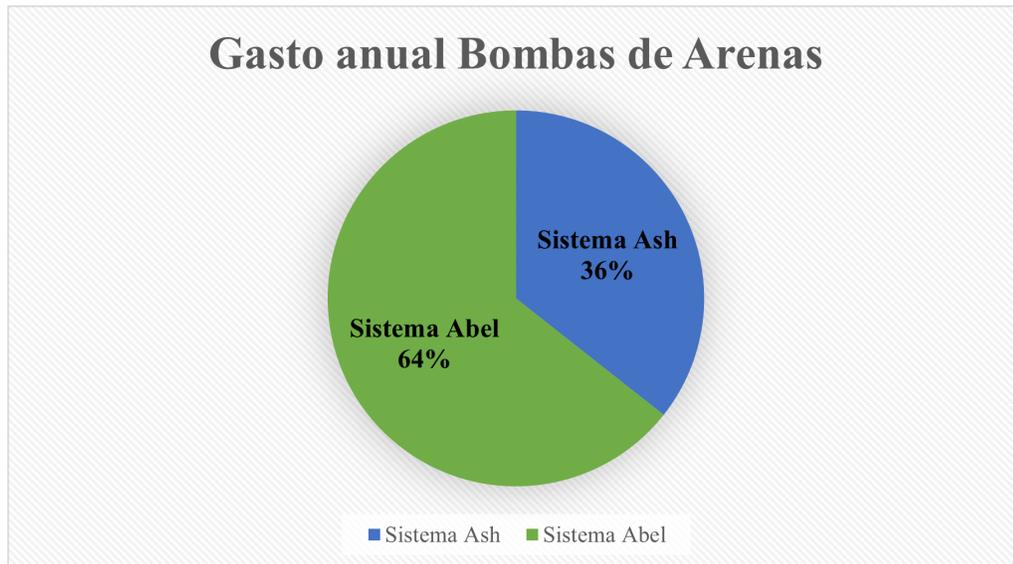
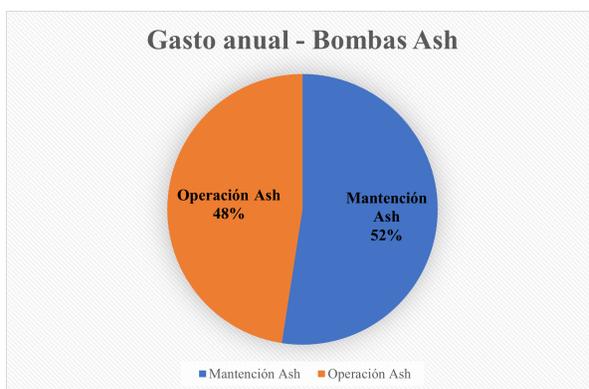


Figura 4.34: Proporción del gasto anual por cada sistema de bombas..

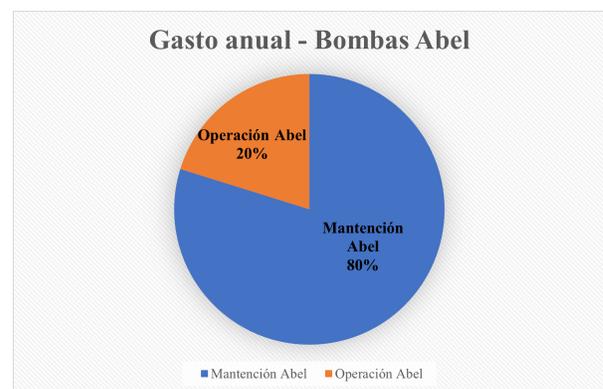
De estos gráficos se obtiene que el Sistema Abel es que más aporta en los gastos anuales de funcionamiento de las bombas, siendo 1,8 veces mayor que el gasto del Sistema Ash. De acuerdo a esto, se estudia el desglose de costos por cada Sistema de bombas relacionado a Mantenimiento y Operación, los cuales se presentan en la Tabla 4.38.

Tabla 4.38: Gasto anual por área las Bombas de arenas en CC, año 2021.

Sistem Ash		Sistema Abel	
Mantenición	Operación	Mantenición	Operación
24.580	22.276	67.551	17.091



(a) Gastos Sistema Ash, 2021



(b) Gasto Sistema Abel, 2021

Figura 4.35: Proporción de gastos de Operación y Mantenimiento por sistema.

De acuerdo a esta información, se destaca que el costo por mantenimiento del Sistema Abel abarca el 51,4 % del gasto anual de estas bombas, siendo un valor bastante elevado solo para

este ítem, y 2,7 veces mayor que lo gastado en mantención para las Bombas Ash. También es importante notar que el servicio de Mantención se lleva el mayor gasto anual para cada una de los Sistemas de bombas. Luego, el desglose detallado por cada Sistema de bombas se presenta en la siguiente Tabla 4.40, donde para cada área nombrada solo se consideran los gastos más relevantes ocurridos durante el año. Por información reservada de la empresa, no se entrará en detalle de lo considerado para cada una de estas áreas.

Tabla 4.39: Desglose del gasto anual por área en CC, año 2021.

	Gasto mantención				Gasto operacional		
	Servicios	Repuestos	Contratos	Otros materiales	Energía	HH Operadores	Servicios mantención
<b>Sistema Ash</b>	2.705	17.421	2.887	1.568	5.722	4.282	12.273
	2 %	13 %	2 %	1 %	4 %	3 %	9 %
<b>Sistema Abel</b>	240	62.568	3.757	987	291	9.551	7.249
	0,2 %	47,6 %	2,9 %	0,8 %	0,2 %	7 %	6 %

Acá es posible notar que el área de Repuestos para las Bombas Abel abarca el 47,6 % del total del gasto anual, seguida por Repuestos de las Bombas Ash con un 13,2 % del total anual. En tercer lugar están los Servicios de Mantención de las Bombas Ash, con un 9,3 % del gasto total. Este último costo considera los Bulldozer necesario para la remoción de arenas en el muro del tranque por la forma en que deposita las arenas este sistema.

Con los gastos ya caracterizados, se procede con el cálculo del costo de operar mensualmente cada bomba, el costo por kilotonelada transportada y el desglose de gastos por kilotonelada.

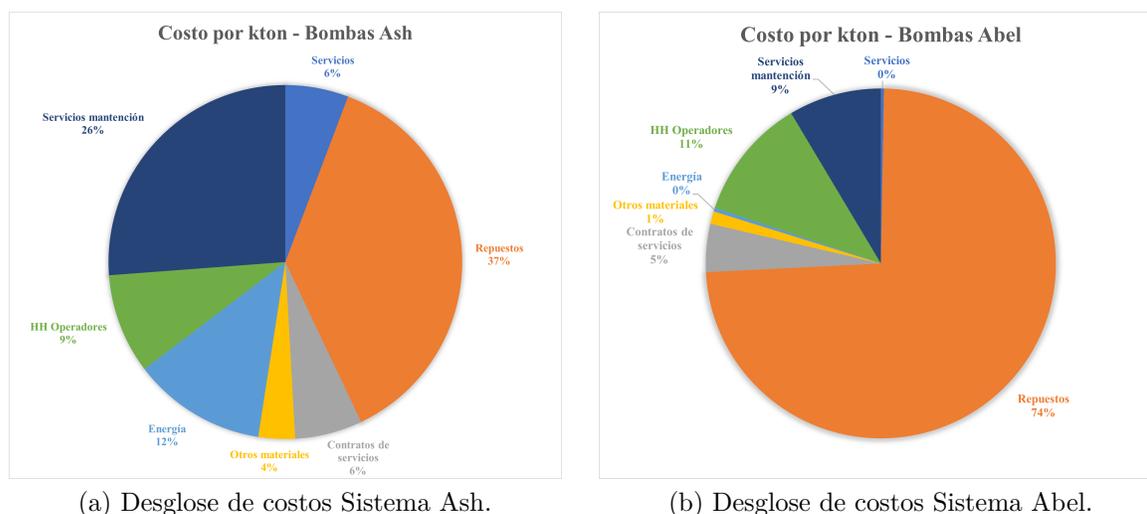


Figura 4.36: Desglose de costos por kilotonelada.

Tabla 4.40: Desglose de los costos por kilotonelada

	Gasto mantención				Gasto operacional		
	Servicios	Repuestos	Contratos	Otros materiales	Energía	HH Operadores	Servicios mantención
Sistema	1,31	8,42	1,40	0,76	2,77	2,07	5,93
Ash	6%	37%	6%	3%	12%	9%	26%
Sistema	0,49	127,02	7,63	2,00	0,59	19,39	14,72
Abel	0,3%	73,9%	4,4%	1,2%	0,3%	11,3%	8,6%

Con estos resultados es posible dar indicadores mensuales generales de gastos para cada sistema, separando costo de operación y costo de mantención. Este resumen se presenta a continuación en las Tablas 4.41 y 4.42 en *CoppCoin*.

Tabla 4.41: Indicadores diarios y mensuales de gastos, Sistema Ash 2021.

Sistema de Bombas Ash					
kton diario	Gasto diario	Gasto por kton	Op mensual	Mtto mensual	Total al mes
5,67	128,38	22,65	1.856	2.048	3.904

Tabla 4.42: Indicadores diarios y mensuales de gastos, Sistema Abel 2021.

Sistema de Bombas Abel					
kton diario	Gasto diario	Gasto por kton	Op mensual	Mtto mensual	Total al mes
1,81	311,19	171,83	1.899	7.505	9.404

## 4.5.2. Beneficios

A continuación se describen los beneficios de implementar cada una de las mejoras técnicas propuestas, beneficios en cuanto al ahorro económico anual para el sistema de bombeo.

### 4.5.2.1. Beneficios mejoras técnicas - Bombas Ash

La implementación de estas mejora produce una mayor disponibilidad del sistema, para utilizar en casos donde el las bombas principales queden fuera de operación por problemas internos de ellas (Fallas MNP) y no por problemas operacionales. Sumando a esto el sistema de monitoreo, permitirá reducir las detenciones de manera general. Además de ello, con esta mejora se asegura que el tranque podrá continuar hasta el año de término de operación 2027.

En la Tabla 4.43 se presenta el impacto de ahorro que tienen cada mejora en el gasto total del Sistema Ash, junto a su equivalencia en *CoppCoin* anual.

Tabla 4.43: Ahorro económico por mejoras técnicas, Sistema Ash.

	Ahorro	Ahorro anual [CC]
Proyecto mejoras	30 %	14.057
Sistema de monitoreo	15 %	7.029

#### 4.5.2.2. Beneficios mejoras técnicas - Bombas Abel

La implementación de estas mejoras impacta en volver a tener disponible este sistema, de manera en Stand-By, dando una tercera opción de funcionamiento a la operación del Tranque de relaves para depositación de arenas en el muro. Sumado a un sistema de monitoreo, disminuirá las fallas permitiendo anticipar eventos no deseados.

En la Tabla 4.44 se presenta el impacto de ahorro que tiene cada mejora en el gasto total del Sistema Abel, junto a su equivalencia en *CoppCoin* anual.

Tabla 4.44: Ahorro económico por mejoras técnicas, Sistema Abel.

	Ahorro	Ahorro anual [CC]
<b>Harnero</b>	20 %	16.929
<b>iConSys</b>	15 %	12.696

#### 4.5.3. Costos

En esta sección se mostrará el detalle de costo de cada una de las mejoras técnicas propuestas, destacando que el valor presentado será el total de implementar para cada sistema de bombas en su totalidad. Además, se mostrará el valor total final de la mejora, sin entrar en detalle del valor de los requerimientos técnicos necesario para cada una.

A continuación en la Tabla 4.45 se muestra el costo total de cada mejora técnica estudiada en la sección anterior. El valor final incluye todos los componentes y servicio necesarios para su implementación.

Tabla 4.45: Costos total de las mejoras técnicas propuestas.

Costos mejoras técnicas			
<b>Bombas Ash</b>	<b>Proyecto mejoras</b>	<b>Sistema de monitoreo</b>	<b>Total</b>
	88.200	17.561	105.761
<b>Bombas Abel</b>	<b>Harnero</b>	<b>iConSys</b>	<b>Total</b>
	27.729	17.439	45.168

#### 4.5.4. Proyecto de inversión

Se plantea el proyecto de inversión para la Gerencia de Mantenimiento de la Mina El Soldado, Anglo American para cada Sistema de Bombas por separado, considerando que en el año cero se realiza la totalidad de la inversión de cada mejora. Además en el flujo de caja se consideran solamente los ahorros pronosticados. El proyecto de inversión se realizará en un horizonte de 5 años, en el cual los bienes se deprecian en su totalidad, además que coincide con el término de operación del Tranque de Relaves El Torito. Para el cálculo del VAN se mantiene la tasa de descuento utilizada del 12%, correspondiente al rubro en Chile[25].

La Tabla 4.46 muestra el proyecto de inversión para las Bombas Ash. La Tabla 4.47 detalla los indicadores económicos de este proyecto, dando como resultados un VAN negativo de -30 [kCC]. La TIR es de 5 % y la inversión se recuperaría en 6,1 años, excediéndose del horizonte de evaluación definido.

Tabla 4.46: Proyecto de inversión, Sistema Ash.

Item/Año	0	1	2	3	4	5
Beneficios		21.086	21.086	21.086	21.086	29.625
Depreciación (-)		19.941	19.941	19.941	19.941	8.180
Flujo antes de impuesto		1.145	1.145	1.145	1.145	21.445
Impuesto (27 %)		309	309	309	309	5.790
Flujo después de impuesto		836	836	836	836	15.655
Depreciación (+)		19.941	19.941	19.941	19.941	8.180
Inversión (-)	105.761	0	0	0	0	0
Flujo de caja	-105.761	20.777	20.777	20.777	20.777	20.777

Tabla 4.47: Indicadores para Proyecto de inversión Sistema Ash.

Indicador	Valor	Unidad
Van	-30.865	CC
TIR	5	%
PRI	6,1	Años

La Tabla 4.48 muestra el proyecto de inversión para la Bombas Abel. La Tabla 4.49 muestra los indicadores económicos de este proyecto, dando como resultados un VAN positivo de 40 [kCC], la TIR de 44 % y la inversión se recuperaría en 1,9 años.

Tabla 4.48: Proyecto de inversión, Sistema Abel.

Item/Año	0	1	2	3	4	5
Beneficios		29.625	29.625	29.625	29.625	29.625
Depreciación (-)		8.180	8.180	8.180	8.180	8.180
Flujo antes de impuesto		21.445	21.445	21.445	21.445	21.445
Impuesto (27 %)		5.790	5.790	5.790	5.790	5.790
Flujo después de impuesto		15.655	15.655	15.655	15.655	15.655
Depreciación (+)		8.180	8.180	8.180	8.180	8.180
Inversión (-)	45.168	0	0	0	0	0
Flujo de caja	-45.168	23.835	23.835	23.835	23.835	23.835

Tabla 4.49: Indicadores para Proyecto de inversión Sistema Abel.

<b>Indicador</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<b>Van</b>	40.751	CC
<b>TIR</b>	44	%
<b>PRI</b>	1,9	Años

# Capítulo 5

## Conclusiones

En base a los resultados y análisis efectuados en el desarrollo de este trabajo, se concluye que:

1. Para el año 2021, la operación de las Bombas Ash y Abel en el Tranque El Torito obtuvo un cumplimiento del 91,6% de arena depositada, equivalente a 3.958 [kton], siendo que cada bomba presenta una tasa de depositación de arenas por hora del 0,38 y 0,39 [kton/hrs] respectivamente. Si bien tienen rendimientos similares, el Sistema Ash muestra una mayor participación, alcanzando el 74% de kilotoneladas transportadas del total movido para ese año. Independiente del funcionamiento dispar que se presenta entre ambos sistemas, se logra cumplir casi en su totalidad con el plan de depositación 2021.

Para el periodo de estudio definido, y de acuerdo a las horas totales de funcionamiento, el Sistema Ash presenta una detención del 46% del tiempo total. Para estas bombas, las detenciones operacionales abarcan el 74% del tiempo por detención, seguido por las detenciones MNP que abarcan el 13% del tiempo, por lo que este sistema no presenta reiterativas fallas mecánicas, si no que se ve interrumpido seguidamente por motivos externos. Dentro de sus modos de falla, las Detenciones causadas por el Molino SAG es lo que más interrumpe la continuidad operativa. Luego se suman todas las fallas mecánicas por desgaste, como Roturas de línea, y por bajo control del sistema, como son todos los problemas de flujo y embanques. En cuanto a sus indicadores, el MTBF más bajo obtenido equivale a 45,45 horas, mes donde ocurren 11 fallas mecánicas. Luego, para el MTTR el más alto obtenido es de 12,52 horas.

Para el periodo de estudio definido en el Sistema Abel, se presenta una detención del 23% del tiempo total. Este tiempo está compuesto por cinco tipos de detenciones, donde las detenciones MNP abarcan el 51% del tiempo, seguido por las detenciones operacionales con el 32%. De acuerdo a esto se entiende que el sistema se ve expuesto a reiterativas fallas mecánicas que interrumpen su funcionamiento. Dentro de sus modos de fallas, las

detenciones causadas por Molino SAg son las que más inciden en el funcionamiento, seguidas por la Saturación de filtros y fallas mecánicas. En cuanto a los indicadores, el menor MTBF obtenido es de 0,72 horas y el mayor MTTR es de 8,17 horas.

Entre estos dos sistemas se visualiza que ambos se ven afectados fuertemente por los incidentes del Molino SAG, interrumpiendo su continuidad operativa. Luego, las Bombas Abel presentan los peores indicadores de mantenimiento, ya que estas se han visto reiteradas veces afectadas por problemas mecánicos en su corto periodo de funcionamiento.

2. Los resultados para diagnóstico y pronóstico del Detector de Anomalías obtenidos para Bombas Ash son de AUC 0,89 y 0,83 respectivamente, y para las Bombas Abel son de 0,98 y 0,91 respectivamente. Esta diferencia en los valores se debe principalmente a la calidad de la data, ya que el Sistema Ash solo presenta registros para dos variables operacionales, en comparación con las Bombas Abel que tienen 8 variables, entre las que se destaca RPM y presiones de la bomba. Estos resultados indican que las nuevas tecnologías permiten realizar análisis automáticos sobre la degradación de los activos. En particular, es posible generar pronósticos (1 hora de anticipación para Bombas Abel y 30 minutos para Bombas Ash) de anomalías en el funcionamiento del sistema. Estos modelos fueron generados con la data existente, en un contexto de baja instrumentación. Aún así, los modelos realizados son simples, es decir que con mejor data y mayor instrumentación, la aplicación de nuevas tecnologías de Deep learning puede ayudar al diagnóstico y predicción de fallas, mejorando los indicadores de mantenimiento.
3. Las mejoras técnicas propuestas apuntan a aumentar la disponibilidad del sistema, centrándose en las fallas que más afectan a cada uno. Para el Sistema Ash, el proyecto de un nuevo tren de bombas impactará positivamente en la disminución de indisponibilidad por detenciones mecánicas. A su vez, el nuevo sistema de monitoreo impactará positivamente en la disminución de indisponibilidad por detenciones operacionales, mayoritariamente causadas por bajo monitoreo de los parámetros de funcionamiento del sistema.

Para el Sistema Abel, las mejoras técnicas propuestas del Harnero y nuevo Sistema de monitoreo impactará positivamente en todas aquellas fallas mecánicas causadas por el bajo monitoreo de condiciones de operación de las bombas, como son las saturaciones de filtro y desgastes. Además de esto, el cambio de Harnero ayudará a cumplir con los parámetros operacionales de la bomba.

4. Para la evaluación económica de las medidas de mejora, se realizó un flujo de caja a 5 años, considerando como beneficio económico el ahorro anual en el costo de operación y mantención de cada sistema. Como inversión se considera el costo de cada una de las mejoras en *CoppCoin*. Los resultados obtenidos para el Sistema Ash de una inversión de 105.761 [CC], con un VAN resultante de -30.865 [CC], TIR de 5 % y un periodo de

retorno de la inversión de 6,1 años. Los resultados para las Bombas Abel es una inversión de 45.168 [CC], con un VAN de 40.751[CC], TIR de 44 % y un PRI de 1,9 años. Cabe destacar que la evaluación se realiza a 5 años ya que es la vida útil restante del Tranque. Además, no se considera en la evaluación la importancia del Tranque para el negocio Min-Co de El Soldado, ya que si bien el Tranque es un gasto para la operación, el mal funcionamiento del mismo detiene el negocio. Es por esto que no solo se debe considerar el VAN negativo para el caso de Bombas Ash, dado que falta una evaluación conjunta del negocio, con visión global.

# Bibliografía

- [1] Anglo American. *Operaciones, proporcionamos al mundo un suministro sustentable de cobre*. [En línea] <https://chile.angloamerican.com/operaciones.aspx#/projects-operations-offices-headquarters/diamonds-copper-platinum-coal> Santiago, Chile.
- [2] Anglo American. *Nuestro propósito*. [En línea] <https://chile.angloamerican.com/acerca-de-nosotros/nuestro-proposito.aspx> Santiago, Chile.
- [3] Anglo American. (2020) *El Soldado. Proyecto de Transformación*. Anglo American, Santiago.
- [4] Anglo American. *Tecnologías Aplicadas a la Operación de Planta de Sulfuros* Anglo American, Santiago.
- [5] Sernageomin. (2020) *Anuario de la minería de Chile*. [En línea] [https://www.sernageomin.cl/pdf/anuario\\_de\\_la\\_mineria\\_de\\_chile\\_2020\\_290621.pdf](https://www.sernageomin.cl/pdf/anuario_de_la_mineria_de_chile_2020_290621.pdf) Santiago, Chile.
- [6] Carvajal, M. (2018) *Desarrollo de una metodología para análisis de estabilidad física de depósitos de relaves*. [Tesis de Pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/152946/Desarrollo-de-una-metodolog%C3%ADa-para-an%C3%A1lisis-de-estabilidad-f%C3%ADsica-de-dep%C3%B3sitos-de-relaves.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [7] Bnamericas. (2020) *Demanda mundial de cobre podría crecer 28 % en una década*. [En línea] <https://www.bnamericas.com/es/noticias/demanda-mundial-de-cobre-podria-crecer-28-en-una-decada> Santiago, Chile.
- [8] Sernageomin. *Preguntas frecuentes sobre relaves*. [En línea] <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/Preguntas-frecuentes-sobre-relaves.pdf> Santiago, Chile.
- [9] Ministerio de Minería. (2007). *Decreto supremo N°248. Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves*. [En línea] [https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/DS248\\_Reglamento\\_DepositosRelave.pdf](https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/DS248_Reglamento_DepositosRelave.pdf) Santiago, Chile.
- [10] Anglo American. (2020). *Manual de operaciones Tranque de Relaves El Torito*. Anglo American, Santiago.
- [11] Aranda, O. (2017). *Propuesta metodológica de análisis de sistemas complejos para la identificación de causa de pérdida de desempeño total del sistema*. [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio Académico de la Universidad Técnica

- Federico Santa María. <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/23667/3560900257361UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [12] Emaint. (). *MTBF, MTTF, MTTR: potentes KPI de mantenimiento*. [En línea] <https://www.emaint.com/es/mtbf-mttf-mttr-maintenance-kpis/> México.
- [13] Gupta, A. (2022). *¿Qué son MTTR, MTBF, MTTF y MTTA? Una guía de métricas de gestión de incidentes*. [En línea] <https://www.motadata.com/es/blog/incident-management-metrics/>
- [14] Géron, A. (2019). *Aprende Machine Learning con Scikit-Learn, Keras y TensorFlow* (2ª Edición). O'Reilly Media.
- [15] Vasilev, I. *Un Tutorial de Aprendizaje Profundo: De Perceptrones a Redes Profundas* [En línea] <https://www.toptal.com/machine-learning/un-tutorial-de-aprendizaje-profundo-de-perceptrones-a-redes-profundas>
- [16] IBM. *¿Qué es Machine Learning?* [En línea] <https://www.ibm.com/cl-es/analytics/machine-learning>
- [17] Cofre, S., López, E., Modarres, M. (2021). *Big Machinery Data Preprocessing Methodology for Data-Driven Models in Prognostics and Health Management* Sensors 2021, 21, 6841. <https://doi.org/10.3390/s21206841>
- [18] Lizana, D., (2022). *Detección de fallas en equipos térmicos a partir de transformadores y mecanismos de atención*. [Tesis de Pregrado, Universidad de Chile].
- [19] Campos, M. (2020). *Introducción al Deep Learning I: Funciones de Activación* [En línea] <https://medium.com/soldai/introducci%C3%B3n-al-deep-learning-i-funciones-de-activaci%C3%B3n-b3eed1411b20>
- [20] Coss, R. (2005). *Análisis y evaluación de proyectos de inversión*. Limusa S.A. Ciudad de México, México.
- [21] Microsoft Ignite. (2022). *Evaluación de los resultados del experimento de aprendizaje automático automatizado* [En línea] <https://learn.microsoft.com/es-es/azure/machine-learning/how-to-understand-automated-ml>
- [22] Weir Minerals. (2022). *Optimización impulsión relaves 3º Tren Alternativo*. Mina El Soldado, Nogales.
- [23] Eral. (2022). *Propuesta Harnero Tranque de Relaves El Torito*. Santiago, Chile.
- [24] Tecfluid. (2022). *Intelligent Condition Pump Monitoring System*. Tecfluid, Santiago.
- [25] Servicios de Impuestos Internos. *Nueva tabla de vida útil de los bienes físicos del activo inmovilizado*. [En línea] [https://www.sii.cl/valores\\_y\\_fechas/tabla\\_vida\\_util\\_activo\\_inmovilizado.html](https://www.sii.cl/valores_y_fechas/tabla_vida_util_activo_inmovilizado.html), Santiago, Chile.

# Anexos

## Anexo A. Plano muro Tranque de Relaves

## A.1. Nudos de descarga

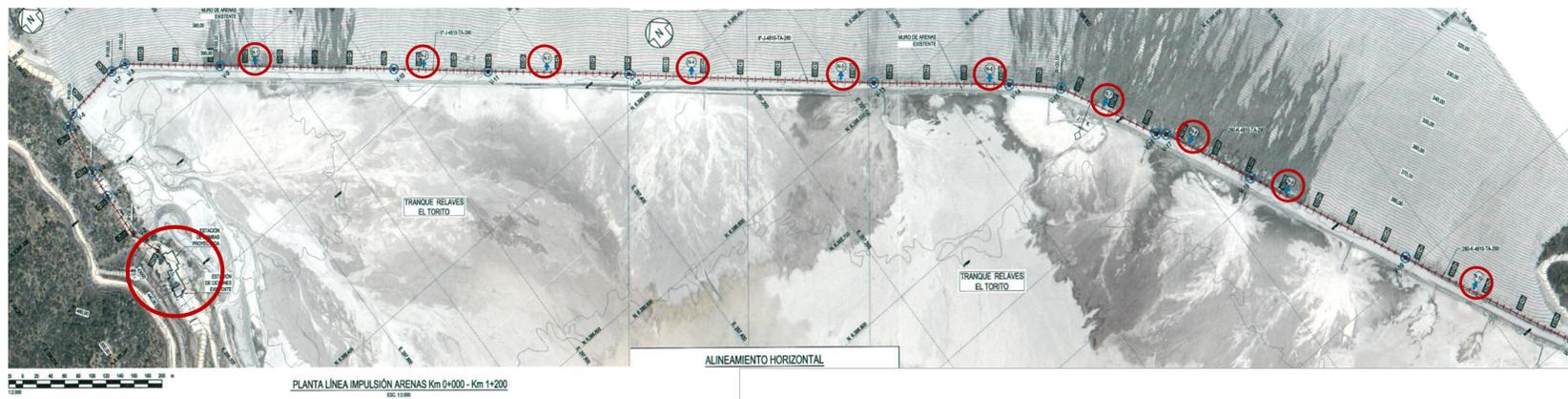


Figura A.1: Plano con nudos de descarga en Muro Tranque El Torito.[10]

## Anexo B. Indicadores de Mantenimiento

## B.1. Detenciones por mes Bombas Ash.

Tabla B.1: Tiempo y cantidad de detenciones por categoría mensual.

Año	SUMA DE HORAS				CANTIDADES DETENCIÓN			
	Fuera de op. [hrs]	Det. Operacional [hrs]	Det. MNP [hrs]	Det. MP [hrs]	Fuera de op.	Det. Operacional	Det. MNP	Det. MP
dic-19	0	108	115	16	0	20	11	2
ene-20	0	329	20	7	0	28	8	1
feb-20	0	182	0	0	0	26	0	0
mar-20	0	187	9	0	0	35	2	0
abr-20	0	235	0	10	0	24	0	1
may-20	124	170	25	0	1	25	7	0
jun-20	343	65	0	0	8	9	0	0
jul-20	200	247	2	9	3	26	3	1
ago-20	441	83	7	2	5	11	1	1
sept-20	360	89	10	8	13	16	4	1
oct-20	21	145	11	26	5	16	2	2
nov-20	118	148	88	0	4	14	7	0
dic-20	25	61	132	0	4	18	7	0
ene-21	0	123	46	19	0	19	6	1
feb-21	175	119	2	16	5	27	1	2
mar-21	526	16	0	7	4	9	0	1
abr-21	69	47	40	11	4	13	4	1
may-21	204	118	1	6	3	13	1	1
jun-21	198	84	29	0	7	12	5	0
jul-21	165	87	0	16	6	15	0	3
ago-21	106	56	37	27	4	12	5	3
sept-21	33	58	16	8	3	8	6	2
oct-21	16	149	32	0	2	20	6	0
nov-21	0	89	16	12	0	12	6	1
dic-21	0	154	3	12	0	24	2	1
ene-22	0	189	12	12	0	23	1	1
feb-22	0	259	25	11	0	27	2	2
<b>TOTAL</b>	<b>721</b>	<b>1242</b>	<b>171</b>	<b>104</b>	<b>25</b>	<b>166</b>	<b>34</b>	<b>14</b>

## B.2. Detenciones por mes Bombas Abel.

Tabla B.2: Tiempo y cantidad de detenciones por categoría mensual.

Año	SUMA DE HORAS				CANTIDADES DETENCIÓN			
	Fuera de op. [hrs]	Det. Operacional [hrs]	Det. MNP [hrs]	Det. MP [hrs]	Fuera de op.	Det. Operacional	Det. MNP	Det. MP
mar-20	24	-	-		-	-	-	-
abr-20	666	10	5	0	-	2	1	0
may-20	545	27	6	10	-	4	5	1
jun-20	237	53	69	11	-	12	12	1
jul-20	540	25	16	0	-	3	3	0
ago-20	251	265	26	12	-	3	6	3
sept-20	297	13	69	34	-	7	13	3
oct-20	1327	17	42	0	-	3	9	0
nov-20	581	17	9	0	-	1	3	0
dic-20	713	0	7	0	-	0	1	0
ene-21	744	0	0	0	-	0	0	0
feb-21	483	10	25	0	-	7	6	0
mar-21	222	75	44	0	-	14	8	0
abr-21	629	3	25	8	-	4	3	1
may-21	509	9	20	0	-	4	7	0
jun-21	526	10	23	0	-	1	7	0
jul-21	564	15	36	0	-	3	6	0
ago-21	603	10	16	10	-	3	2	1
sept-21	667	0	36	0	-	0	5	0
oct-21	744	0	0	0	-	0	0	0
nov-21	682	0	0	0	-	0	1	0
<b>TOTAL</b>	<b>9290</b>	<b>179</b>	<b>352</b>	<b>52</b>	<b>-</b>	<b>47</b>	<b>71</b>	<b>5</b>

### B.3. Indicadores mensuales Bombas Ash.

Tabla B.3: Información mensual KPI's de mantenimiento.

Meses	Horas funcionamiento	Horas detenidas	Fallas	MTBF	MTTR
dic-19	500	115	11	45,45	2,52
ene-20	415	20	8	51,93	0,39
feb-20	288	0	0	-	-
mar-20	509	9	2	254,71	0,03
abr-20	378	0	0	-	-
may-20	377	25	7	53,89	0,46
jun-20	189	0	0	-	-
jul-20	289	2	3	96,44	0,02
ago-20	202	7	1	202,25	0,03
sept-20	245	10	4	61,33	0,16
oct-20	496	11	2	247,79	0,04
nov-20	370	88	7	52,82	1,66
dic-20	500	132	7	71,43	1,85
ene-21	354	46	6	59,07	0,78
feb-21	369	2	1	369,30	0,00
mar-21	171	0	0	-	-
abr-21	557	40	4	139,17	0,29
may-21	376	1	1	375,53	0,00
jun-21	399	29	5	79,76	0,36
jul-21	463	0	0	-	-
ago-21	529	37	5	105,80	0,35
sept-21	598	16	6	99,68	0,16
oct-21	469	32	6	78,17	0,41
nov-21	603	16	6	100,55	0,16
dic-21	563	3	2	281,50	0,01
ene-22	531	12	1	531,00	0,02
feb-22	379	25	2	189,50	0,13

## B.4. Indicadores mensuales Bombas Abel.

Tabla B.4: formación mensual KPI's de mantenimiento.

Meses	Horas funcionamiento	Horas detenidas	Fallas	MTBF	MTTR
abr-20	22	5	1	21,50	4,50
may-20	144	6	5	28,75	1,17
jun-20	388	69	12	32,33	5,71
jul-20	179	16	3	59,67	5,44
ago-20	406	26	6	67,67	4,25
sept-20	317	69	13	24,35	5,31
oct-20	7	42	9	0,72	4,69
nov-20	70	9	3	23,39	2,94
dic-20	28	7	1	28,00	7,00
ene-21	-	-	-	-	-
feb-21	132	25	6	22,07	4,14
mar-21	448	44	8	56,02	5,56
abr-21	58	25	3	19,31	8,17
may-21	189	20	7	27,06	2,87
jun-21	157	23	7	22,42	3,25
jul-21	139	36	6	23,17	5,97
ago-21	102	16	2	51,13	8,08
sept-21	11	36	5	2,10	7,20
oct-21	12	0	0	-	-
nov-21	1	0	1	1,00	0,25
dic-21	-	-	-	-	-