



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

**APLICACIÓN DE MINERÍA DE  
PROCESOS Y OPTIMIZACIÓN DEL  
PROCESO DE MANTENCIÓN DE  
EQUIPOS LHD**

**NICOLÁS FELIPE ALFONSO VELÁSQUEZ AEDO**

Tesis para optar al grado de  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:  
**ANGELINA ANANI**

Santiago de Chile, (Octubre, 2021)

© 2021, Nicolás Velásquez Aedo



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

# APLICACIÓN DE MINERÍA DE PROCESOS Y OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE MANTENCIÓN DE EQUIPOS LHD

**NICOLÁS FELIPE ALFONSO VELÁSQUEZ AEDO**

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

ANGELINA ANANI 

JORGE MUÑOZ-GAMA 

LUIS GUZMÁN 

JORGE VERA 

Para completar las exigencias del grado de  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, (Octubre, 2021)

A mis Padres, familia, amigos y a mi profesora por toda la paciencia y el apoyo en este proceso.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia, profesores y amigos por creer en mí.

A mi profesora por su confianza, guía, paciencia y apoyo en este desafío.

A aquellos que de una u otra forma aportaron al logro de este objetivo, Jorge M-G., Luis G., Juan Carlos S., Jorge V., Felipe C., Matías V., Camila O., Joaquín O., Jorge V., Leonardo V., Carlos A., Alex I., Carlos S., Redco, Enrique R. y Nassam E.

Agradecimientos especiales a mi padre, Patricio Velásquez, a Max Salas y Karina Veloso, por estar siempre.

A todos, por contribuir a hacer de esta experiencia, una maravillosa.

“De las distintas secciones anexas a la mina salen los obreros en confuso tropel. En su prisa por abandonar los talleres se chocan y se estrujan, mas no se levanta una voz de queja o de protesta: los rostros están radiantes”.

Sub Sole. Baldomero Lillo, 1907.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
ÍNDICE DE TABLAS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT .....	xii
1. Introducción.....	1
2. Marco teórico.....	4
2.1. Gestión de equipos mineros.....	4
2.1.1. Relevancia de la mantención de equipos mineros en Chile.....	4
2.1.2. ¿Qué es la gestión de activos? .....	6
2.1.3. Modelo de gestión de mantención - Una mirada estratégica .....	8
2.1.4. Políticas de mantención .....	10
2.1.5. Gestión y ciclo de mejora continua de la mantención .....	17
2.1.6. Priorización de fallas .....	19
2.1.7. Limitantes y oportunidades futuras.....	23
2.2. Minería de Procesos .....	25
2.2.1. Ciencia de los datos y Ciencia de los Procesos .....	25
2.2.2. Estado del Arte – Minería de procesos .....	31
2.3. Descripción y selección de DES .....	35
2.3.1. ¿Qué es DES? .....	35
2.3.2. Estado del arte- DES.....	36
2.3.3. Aporte a la investigación .....	38
3. Hipótesis y Objetivo .....	40
3.1. Hipótesis.....	40
3.2. Objetivo.....	40

4.	Materiales y método.....	41
4.1.	Caso de estudio.....	41
4.2.	Enfoque solución.....	43
4.2.1.	Etapa 1 - Preparación de datos.....	44
4.2.2.	Etapa 2 – Definición y Caracterización de sistemas estudiados ....	46
4.2.3.	Etapa 3 – Modelo de Simulación Base .....	56
4.2.4.	Etapa 4 – Modelo de Simulación Ampliado .....	59
4.2.5.	Etapa 5 – Modelo y análisis con minería de procesos .....	62
5.	Análisis del modelo .....	65
5.1.	Consideraciones del análisis.....	65
5.2.	Posibles focos de estudio.....	65
5.3.	Análisis general .....	66
5.4.	Análisis de comportamiento generado versus comportamiento esperado	68
5.5.	Análisis de principales desviaciones del proceso.....	69
5.5.1.	Diagnóstico/Evaluación Inicial.....	69
5.5.2.	Tiempo de reacción.....	78
5.5.3.	Priorización de fallas .....	79
5.5.4.	Proceso de preparación .....	80
5.5.5.	Mantenimiento efectiva y regreso a operación .....	82
6.	Resultados y discusión.....	84
6.1.	Posibles mejoras a raíz del análisis realizado.....	85
6.2.	Trabajo futuro propuesto .....	87
7.	Conclusiones.....	88
	BIBLIOGRAFIA.....	90
	A N E X O S.....	94
	Anexo A : Diagrama de Jack Knife, Componentes del Sistema de Tren de Potencia, 2018. (Elaboración propia). .....	95
	Anexo B : Diagrama de Jack Knife, Componentes del Sistema de Tren de Potencia, 2019. (Elaboración propia). .....	96

Anexo C : Diagrama de Jack Knife en base a costo global, fallas 2018. (Elaboración propia).  
97

Anexo D : Diagrama de Jack Knife en base a costo global, fallas 2019. (Elaboración propia).  
98

Anexo E : Visualización base de minería de procesos con principales variantes. Fuente:  
(Elaboración propia en disco). ..... 99

Anexo F : Flujo de proceso - Casos reparados en terreno. Fuente: (Elaboración propia en  
disco). ..... 100

Anexo G : Flujo de proceso - Casos reparados en taller. Fuente: (Elaboración propia en  
disco). ..... 102

Anexo H : Flujo de proceso - Operador equivoca el diagnóstico. Fuente: (Elaboración propia  
en disco). ..... 104

Anexo I : Flujo de proceso - Operador indica erróneamente que la falla no se puede reparar  
en terreno. Fuente: (Elaboración propia en disco). ..... 106

Anexo J : Flujo de proceso - Operador indica erróneamente que la falla se puede reparar en  
terreno. Fuente: (Elaboración propia en disco). ..... 107

Anexo K : Flujo de proceso - Operador solicita asistencia en terreno del mantenedor. Fuente:  
(Elaboración propia en disco). ..... 108

Anexo L : Flujo de proceso - Operador lleva el equipo directo al taller. Fuente: (Elaboración  
propia en disco). ..... 109

Anexo M : Flujo de proceso - Operador debe esperar por camioneta. Fuente: (Elaboración  
propia en disco). ..... 110

Anexo N : Flujo de proceso - Etapa de preparación. Fuente: (Elaboración propia en disco).  
111

Anexo Ñ : Flujo de proceso - Etapa de Mantenimiento efectiva y regreso a operación. Fuente:  
(Elaboración propia en disco). ..... 112

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Ejemplo base de datos de Avisos.....	44
Tabla 4.2: Ejemplo base de datos de Órdenes.....	45
Tabla 4.3: Sistemas, componentes y subcomponentes.....	47
Tabla 4.4: Distribuciones de Sistemas .....	48
Tabla 4.5: Distribución de Tiempo de actividades del proceso de mantención.....	60
Tabla 5.1: Actividades adicionales encontradas y grasas del proceso .....	68
Tabla 5.2: Resumen comparativo de variantes reparadas en taller vs terreno .....	72
Tabla 5.3: Resumen comparativo según gravedad de fallas reparadas en taller. Fuente: (Elaboración propia).....	79
Tabla 6.1: Resumen de oportunidades encontradas. Fuente: (Elaboración propia).....	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2-1: Producción mina de cobre en Chile y el mundo. Fuente: Consejo Minero a partir de información de Cochilco e ICSG, 2021.....	4
Figura 2-2: Producto Interno Bruto (US\$ a precios actuales) de Chile a lo largo de los ciclos del cobre. Fuente: Elaboración propia a partir de Banco de Datos del Banco Mundial.....	6
Figura 2-3: Modelo de gestión de mantención. Fuente: (Viveros et al, 2013).....	8
Figura 2-4: Modelo de gestión RID. Fuente: (Louit, 2002).....	10
Figura 2-5: Desglose de acciones de mantención. Fuente: Adaptado de Moubray (2000). .....	15
Figura 2-6: Modelo ASARCO y OEE. Fuente: Moubray (2000). ....	16
Figura 2-7: Ciclo de mejora continua en mantenimiento a nivel operacional. Fuente: (Viveros et al, 2013).....	17
Figura 2-8: Etapas del proceso de ejecución de mantención. Fuente: Elaboración propia en base a Selvik & Ford (2017).....	18
Figura 2-9: Histograma de Pareto de tiempo fuera de servicio de una pala de carguío. Fuente: (Knights, 2005). ....	21
Figura 2-10: Segmentación de cuadrantes en problemas de (A) confiabilidad, (B) mantenibilidad y (C) disponibilidad. Fuente: (Knights, 2005). ....	23
Figura 2-11: (sub)disciplinas que conforman <i>Data Science</i> . Fuente: (Van Der Aalst, 2016). ....	26
Figura 2-12: (sub)disciplinas de <i>Process Science</i> . Fuente: (Van Der Aalst, 2016). ....	27
Figura 2-13: Minería de Procesos como puente. Fuente: (Van Der Aalst, 2016). ....	29
Figura 2-14. Registros de publicaciones por años. Fuente: (Kulakli, 2021).....	32
Figura 4-1: Flujo ideal de mantención de equipos LHD, construido en base a juicio experto. Fuente: (Elaboración propia).....	42
Figura 4-2: Etapas de desarrollo del modelo y análisis. Fuente: Elaboración propia. ....	43
Figura 4-3: Representación de equipo de mantención y parque de equipos. Fuente: Elaboración propia. ....	46
Figura 4-4: Diagrama de Pareto - Tiempo fuera de servicio, 2018. (Elaboración propia). .....	49
Figura 4-5: Diagrama de Pareto - Tiempo fuera de servicio, 2019. (Elaboración propia). .....	49
Figura 4-6: Diagrama de Jack Knife fallas 2018. (Elaboración propia). ....	51
Figura 4-7: Diagrama de Jack Knife fallas 2019. (Elaboración propia). ....	51
Figura 4-8: Diagrama de Jack Knife. Evolución de desempeño de los sistemas en años estudiados. (Elaboración propia).....	52
Figura 4-9: Gráfico de confiabilidad de sistemas. (Elaboración propia). ....	55
Figura 4-10: Diagrama de Pareto - Tiempo fuera de servicio – Modelo base, 2019. (Elaboración propia).....	58

Figura 4-11: Esquema del modelo simulado del proceso de mantenimiento de equipos LHD. Fuente: (Elaboración propia). .....	61
Figura 4-12: Ejemplo de datos obtenidos del modelo ampliado. Fuente: (Elaboración propia). .....	62
Figura 4-13: Estructura del log de eventos utilizado. Fuente: (Elaboración propia). .....	63
Figura 4-14: Visualización base de minería de procesos con principales variantes. Fuente: (Elaboración propia). .....	64
Figura 5-1: Esquema referencial de proceso con actividad de lavado. Fuente: Elaboración propia. ....	67
Figura 5-2: Flujo de proceso - Casos reparados en terreno. Fuente: (Elaboración propia). .....	70
Figura 5-3: Flujo de proceso - Casos reparados en taller. Fuente: (Elaboración propia). ..	71
Figura 5-4: Flujo de proceso - Operador equivoca el diagnóstico. Fuente: (Elaboración propia). .....	73
Figura 5-5: Flujo de proceso - Operador indica erróneamente que la falla no se puede reparar en terreno. Fuente: (Elaboración propia). .....	74
Figura 5-6: Flujo de proceso - Operador indica erróneamente que se puede reparar en terreno. Fuente: (Elaboración propia). .....	75
Figura 5-7: Flujo de proceso - Operador solicita asistencia en terreno del mantenedor. Fuente: (Elaboración propia). .....	76
Figura 5-8: Flujo de proceso - Operador lleva el equipo directo al taller. Fuente: (Elaboración propia). .....	77
Figura 5-9: Flujo de proceso - Operador debe esperar por camioneta. Fuente: (Elaboración propia). .....	78
Figura 5-10: Flujo de proceso – Etapa de preparación. Fuente: (Elaboración propia). ...	81
Figura 5-11: Flujo de proceso – Etapa de Mantenimiento efectiva y regreso a operación. Fuente: (Elaboración propia). .....	83
Figura 6-1: Pareto de impacto de fallas del proceso. Fuente: (Elaboración propia). .....	85

## RESUMEN

Existe un amplio desarrollo de técnicas orientadas a definir cuáles son los componentes críticos de un equipo, y cuándo y cómo deben pasar por un proceso de mantenimiento, sin embargo, aún existe una oportunidad de mejora en cuanto al desarrollo y eficiencia del proceso mismo de mantención. La investigación, desarrollada con el apoyo de una importante minera subterránea en Chile, tiene por objetivo poner a prueba la hipótesis de que la implementación de técnicas de minería de procesos (sub-disciplina de las Ciencias de Datos) en los ciclos de mantenimiento de equipos mineros (LHD - *Load Haul Dump*) permitirá optimizar el flujo de trabajo. Esto se logra mediante análisis orientado a procesos. Para ello, se requiere llevar datos de bajo nivel a un log de eventos apropiado. Este trabajo presenta la primera integración de DES y minería de procesos para generar un log de eventos desde data de bajo nivel y determinar los cuellos de botella y su impacto en el ciclo de mantenimiento de los equipos de minería subterránea. El diagnóstico generado desglosa pérdidas operativas de aproximadamente 23.800 hrs de equipo detenido por año, con un costo, por no producción de cerca de 1,12 MUSD/año. La detección de estas brechas permite identificar oportunidades de mejora, evaluar cada caso y definir acciones correctivas para lograr una mejor gestión del proceso de mantención.

Palabras Claves: minería de procesos, minería subterránea, procesos mineros, gestión de activos físicos, log de eventos, DES, simulación, proceso de mantención, *process mining*, *underground mining*, *mining process*, *physical asset management*, *event logs*, DES, *simulation*, LHD, *maintenance process*, *low-level data*.

## ABSTRACT

There is extensive development of techniques aimed at defining which are the critical components of a piece of equipment, and when and how they must go through a maintenance process, however, there is still an opportunity for improvement in terms of the development and efficiency of the maintenance process itself. The research, developed with the support of a major underground mining company in Chile, aims to test the hypothesis that the implementation of process mining techniques (sub-discipline of Data Sciences) in the equipment maintenance process (LHD - Load Haul Dump) will allow to optimize the workflow. This is achieved through process-oriented analysis. To do this, it is required to bring low-level data to an appropriate event log. This paper presents the first integration of DES and process mining to generate an event log from low-level data and determine bottlenecks and their impact on the maintenance cycle of underground mining equipment. The diagnosis generated breaks down operating losses of approximately 23.800 hours of equipment stopped per year, with a cost due to non-production of about 1.12 MUSD/year. The detection of these gaps allows identifying opportunities for improvement, evaluating each case and defining corrective actions to achieve better management of the maintenance process.

Keywords: minería de procesos, minería subterránea, procesos mineros, gestión de activos físicos, log de eventos, DES, simulación, proceso de mantención, *process mining*, *underground mining*, *mining process*, *physical asset management*, *event logs*, DES, *simulation*, LHD, *maintenance process*, *low-level data*.

## 1. INTRODUCCIÓN

Existe un creciente interés en la industria minera por innovar e incorporar nuevas tecnologías en sus operaciones, lo que tiene entre sus principales ejes el uso del *Big Data* y la implementación de las Ciencias de datos (*Data Science*) en sus procesos (Matysek, & Fisher, 2016; Lee, Kao & Yang, 2014). Otros estudios plantean que aún existe una brecha importante en relación con la implementación de las ciencias de los datos en la industria minera (Qi, 2020; Ali & Frimpong, 2020; Zelinska, 2020), lo que se proyecta cambie en el corto plazo con la irrupción y desarrollo en mayor escala de estas tecnologías.

Esto podría tener un impacto positivo en áreas como, por ejemplo, mantenimiento, al actuar como habilitante para mejorar la gestión de equipos mineros, la cual concentra un gran interés y ha sido ampliamente estudiada desde la década de los 60's (Moubray, 2000). Actualmente, este interés se debe a que el costo de mantención en la industria minera representa entre un 30% y un 50% de los costos operativos (Galar et al., 2014), y a las lecciones aprendidas de un ciclo de bajos precios que se ha extendido desde fines de 2014, lo que ha obligado a la industria a reducir costos, relevando la necesidad de contar con equipos de alta disponibilidad. En este contexto varios han sido los esfuerzos por optimizar procesos mediante el uso de *Data Science* (Barnewold, & Lottermoser, 2020 ; Hyder, Siau, & Nah, 2019), sin embargo, aún existe una deuda en cuanto a la cantidad y calidad de los datos, lo que limita algunas de las nuevas aplicaciones posibles.

A pesar de que avances como la automatización han permitido el aumento del flujo de datos, aún existen brechas en el uso eficiente de estos para una correcta gestión de los recursos, poniendo sobre la mesa interrogantes como qué datos recopilar, cómo recopilar

esos datos de la mejor manera y cómo gestionarlos. Esta brecha es relevante puesto que predispone el desarrollo de nuevas aplicaciones de la ciencia de los datos en la industria minera.

Por otro lado, la mayor disponibilidad de datos permite tener un mejor seguimiento de los *Key Performance Indicators* (KPI's) por unidad funcional (Producción, Abastecimiento, Mantenimiento, etc.). Esto plantea el desafío organizacional de ser capaces de abordar las oportunidades a nivel global (corporativo) y no perderse en la búsqueda del logro individual de una unidad funcional. Por ello, se hace necesaria la existencia de un medio que facilite el uso de estos datos para mejorar la interacción entre departamentos, a fin de eliminar los silos organizacionales y cooperar en función de metas corporativas.

El objetivo de esta investigación es presentar y evaluar en condiciones teóricas las ventajas de implementar Minería de Procesos (sub-disciplina de la Ciencia de los Datos) dentro del sistema de gestión de equipos mineros, en específico, el análisis del ciclo de mantenimiento desde un punto de vista de procesos. Para ello, se realiza la primera integración de DES y minería de procesos para llevar una base de datos de bajo nivel a un log de eventos apropiado.

Se espera que el desarrollo de esta disciplina en la industria minera permita reducir el tiempo medio para reparar; realizar análisis desde el punto de vista del proceso del ciclo de mantenimiento (Van Der Aalst, 2016); apoyar la detección y monitoreo de la causa raíz de las fallas en la gestión de activos; y generar una mejor estrategia para enfrentar las mismas. En teoría, el cumplir estos objetivos permitirá en el mediano – largo plazo aumentar la disponibilidad de los equipos, aumentar el OEE (*Overall Equipment Effectiveness* -

Efectividad total de los Equipos) de la mina y mejorar la interacción entre las diferentes unidades funcionales.

Entre los principales hallazgos de este estudio se encuentra la detección de una oportunidad de mejora en el ciclo de mantención de equipos. Para aprovechar esta situación y optimizar el proceso, primero se requiere mejorar la recolección de datos respecto a las actividades desarrolladas desde que falla un equipo hasta su regreso a operaciones. La principal contribución de esta investigación es sentar los primeros precedentes respecto a la implementación de minería de procesos para optimizar el ciclo de mantención de equipos mineros, así como relevar la necesidad de generar un estudio en terreno o piloto de prueba industrial para evaluar las ventajas que dicha incorporación pueda presentar a la industria en un contexto operativo real.

En la siguiente sección (2) se presenta un Marco Teórico, donde se da una introducción a las disciplinas de gestión de activos físicos, minería de procesos y DES. En la sección 3 se presenta la Hipótesis y el Objetivo del estudio. En las secciones 4 y 5 se desarrolla los Materiales y Métodos y el Análisis del modelo, respectivamente. En la sección 6 se abordan los Resultados y Discusión. En la sección 7 se encuentra la conclusión de la investigación.

## 2. MARCO TEÓRICO

El propósito de esta sección es exponer el marco teórico relativo a las diferentes disciplinas que constituyen la investigación para facilitar la comprensión del lector.

### 2.1. Gestión de equipos mineros

#### 2.1.1. Relevancia de la mantención de equipos mineros en Chile

Chile es uno de los mayores productores de cobre del mundo, produciendo el 28% del cobre mundial (Consejo Minero, 2021) como se presenta en la Figura 2-1. Esta posición se logra luego de años de desarrollo de la industria minera nacional, siendo posible definir los primeros vestigios de la minería en la época precolombina, donde comunidades indígenas extraían cobre del sector en que actualmente se emplaza la Mina Chuquicamata (Fuller, 2004).



Figura 2-1: Producción mina de cobre en Chile y el mundo. Fuente: Consejo Minero a partir de información de Cochilco e ICSG, 2021.

La importancia de la minería para el desarrollo del país se puede apreciar al analizar el efecto que tuvo entre el año 2003 y 2014 el Super Ciclo del cobre, donde en 2008 por primera vez el precio supera los US\$4/lb impulsado por el desarrollo de China, quien llega a ser el principal socio comercial de Chile en 2010. Este auge motivó el desarrollo de tecnologías que permitieran extraer mineral a gran escala promoviendo el crecimiento del tamaño de los equipos utilizados (Ministerio de Minería, 2018).

Esta relación es explicada por el Consejo minero (2019):

“La minería en general, pero particularmente la del cobre, ha llegado a ser el sector más activo en el desarrollo de la economía nacional debido al monto de sus inversionistas y la magnitud alcanzada en la producción de cobre”.

El fin de este período en 2014 estuvo marcado por cambios en la economía mundial, el anuncio de China de recortar su proyección de crecimiento económico y la disminución de las leyes de los principales yacimientos chilenos. Si bien, este período permitió que el PIB chileno se elevara en MUS\$ 180.200 (Figura 2-2), lo que impulsó el desarrollo de la época, también dejó una gran tarea para la industria cuando llegó a su fin, reducir costos para sobrevivir. Una de las estrategias fue apostar a mayores volúmenes de explotación, sin embargo, esto ha aumentado la dependencia de la disponibilidad mecánica de equipos cada vez más grandes, lo que ha posicionado a la gestión de activos como un actor clave de la industria minera actual.

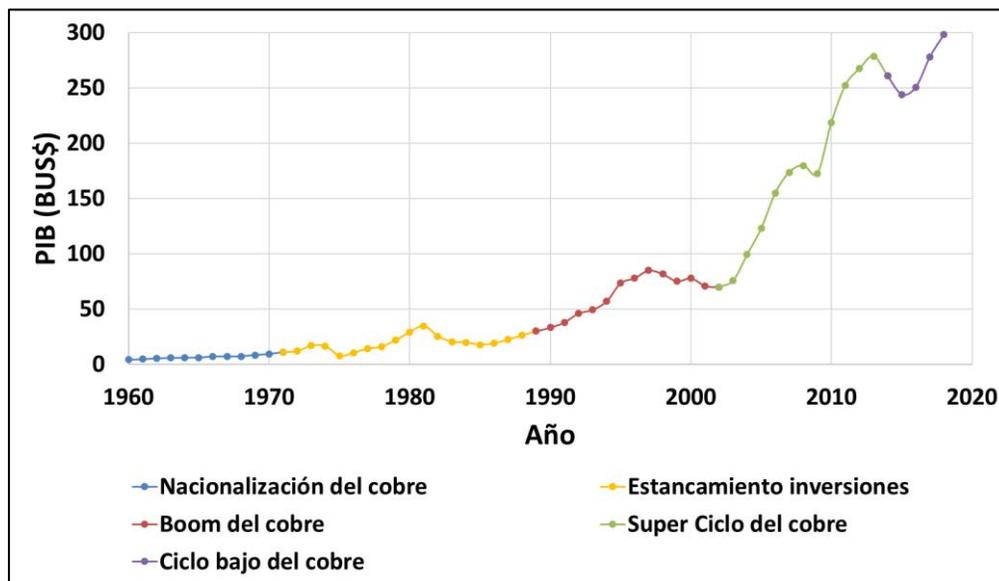


Figura 2-2: Producto Interno Bruto (US\$ a precios actuales) de Chile a lo largo de los ciclos del cobre. Fuente: Elaboración propia a partir de Banco de Datos del Banco Mundial.

### 2.1.2. ¿Qué es la gestión de activos?

Las raíces de la gestión de activos físicos se encuentran en la disciplina del mantenimiento, la cual quizás corresponda a una de las disciplinas gerenciales que más ha cambiado en los últimos años (Moubray, 2000) debido a la variedad de activos que han surgido, nuevos métodos de mantenimiento y a la evolución de los estándares exigidos a la disciplina en las diferentes organizaciones e industrias.

Según el British Standards Institute (1984) se puede definir la mantención como: “La combinación de todas las técnicas y acciones administrativas y gerenciales realizadas durante el ciclo de vida de un ítem orientadas a mantener o restaurar el ítem hasta un estado en el que pueda desempeñarse según lo requiera su función”.

La gestión de activos por su parte se puede definir a nivel general como toda actividad coordinada de una organización para obtener valor a partir de los activos

(ISO, 2014). Pascual (2005) introduce una definición más específica a la gestión de activos físicos en su libro “El arte de mantener”, donde la define como el conjunto de políticas de mantención, planificaciones, diseño, acciones y actividades que se desarrollan con el fin de cumplir con el objetivo operacional y de negocio, desde un óptimo desempeño de los equipos con tal que se mantenga un equilibrio entre las necesidades de los diferentes *stakeholders* involucrados en el negocio.

En resumen, la gestión de activos físicos busca asegurar que los activos continúen haciendo lo que sus usuarios quieren que hagan (Moubray, 2000). Sin embargo, como indica Pascual (2005), a estas definiciones es necesario adicionar todas las acciones realizadas antes del montaje de los activos (etapa de diseño) y de la vida útil nominal del equipo, ya que esto también determina las acciones a tomar durante el ciclo de vida del activo.

Actualmente, el costo de mantención en la industria minera representa entre un 30% y un 50% de los costos operativos (Lewis & Steinber, 2001 ; Galar et al., 2014). Esto se debe principalmente a que la minería moderna es altamente mecanizada y dependiente de los equipos. Por ejemplo, la búsqueda de reducir costos medios mediante el uso de camiones cada vez más grandes, aumenta la criticidad de estos en las operaciones, lo que obliga a mejorar las políticas de mantención. Lo anterior, debido a que a medida que los equipos son más grandes, el costo de mantención de sus componentes también lo es.

Así, el *boom* de mecanización, escalamiento y automatización de los últimos años ha generado que la industria se vuelque al análisis de la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad como pilares de la gestión de activos físicos.

### 2.1.3. Modelo de gestión de mantención - Una mirada estratégica

Para ello, Viveros et al (2013) propone en su estudio, “Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo”, directrices sobre cómo gestionar el mantenimiento de equipos y qué herramientas se pueden integrar en cada etapa con el fin de lograr un mejor desempeño. Una idea general del modelo se presenta en la Figura 2-3, donde se evidencian las 7 etapas de la propuesta cuyo pilar fundamental es la búsqueda de la mejora continua.

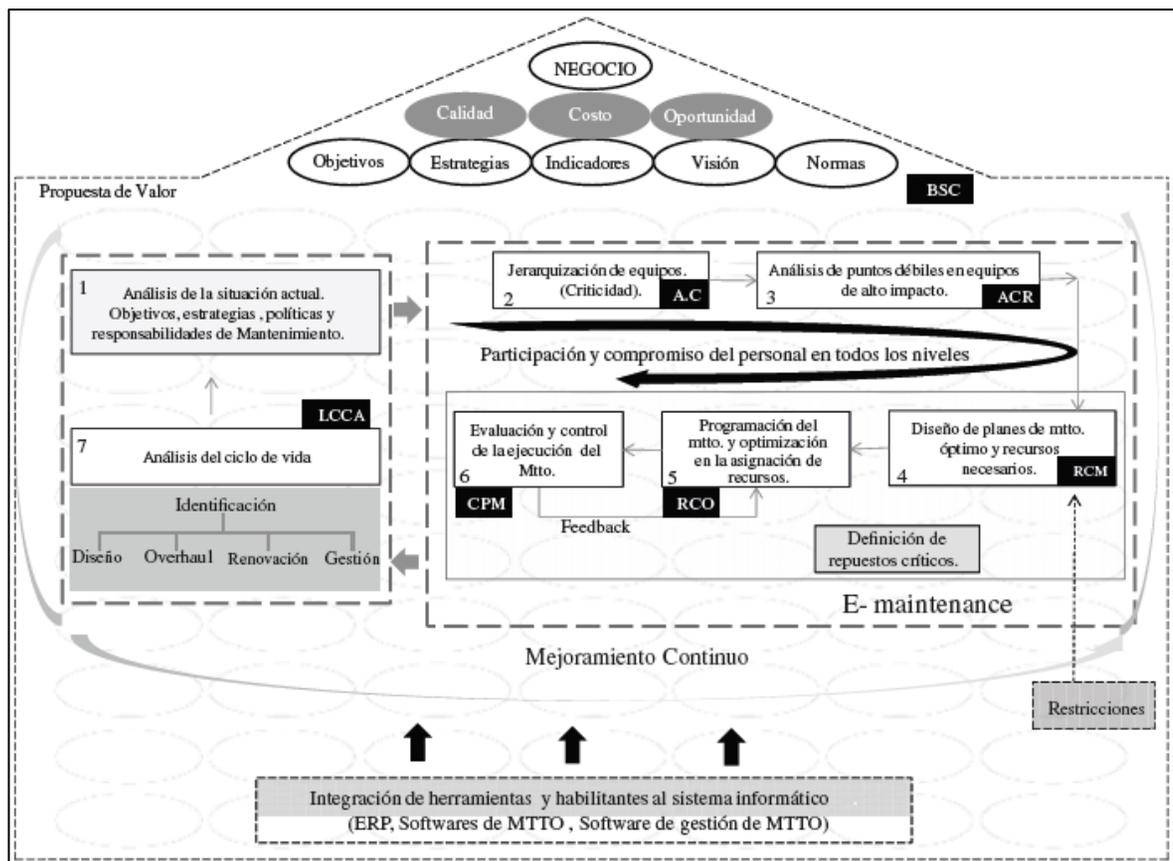


Figura 2-3: Modelo de gestión de mantención. Fuente: (Viveros et al, 2013).

En específico las etapas son las siguientes:

- Análisis de la situación actual.
- Jerarquización de equipos y subcomponentes según criticidad.
- Análisis de puntos débiles en equipos de alto impacto (análisis de causa raíz).
- Diseño de planes de mantención y recursos necesarios.
- Programación del mantenimiento y optimización en la asignación de recursos.
- Evaluación y control de la ejecución de mantención.
- Análisis de ciclo de vida de los equipos.

La aplicación consecutiva de estas etapas tiene como finalidad utilizar toda la información disponible para tomar decisiones estratégicas que permitan garantizar la mayor disponibilidad de los equipos críticos, con el menor costo global.

La Figura 2-3, muestra que todo este modelo de gestión es soportado y apoyado por la integración de herramientas y habilitantes tecnológicos. Estas herramientas de gestión cumplen un rol fundamental debido a que permiten administrar una gran cantidad de datos y presentarlos de una manera organizada para el análisis de especialistas, lo que facilita y ayuda a mejorar la planificación de la mantención.

Otro de los modelos de gestión disponibles en la bibliografía, corresponde al Modelo RID (*Reliability Improvement Diamond* - Diamante de mejora de confiabilidad) desarrollado por Darko Louit (2002). Como se puede apreciar en la Figura 2-4, las bases del modelo coinciden con el de Viveros et al. en aspectos como la priorización de fallas según criticidad, la búsqueda de los modos de falla y su causa raíz (FMECA, *Failure mode, effects and criticality analysis* - Modo de fallo, efectos y análisis de criticidad) y el uso de RCM (*Reliability Centred Maintenance* -

Mantenimiento basada en la confiabilidad) para el diseño del plan de mantenimiento. Estas aparecen como palancas de la mejora continua que permite implementar acciones de optimización en un ciclo de revisión constante.

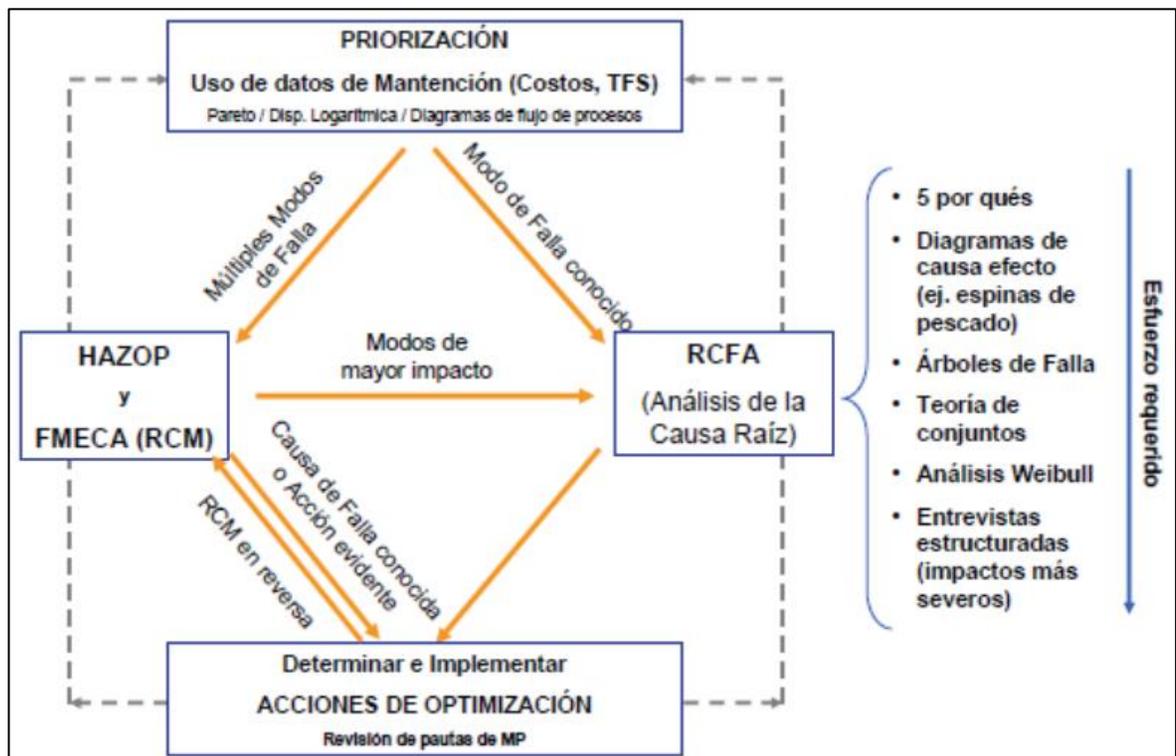


Figura 2-4: Modelo de gestión RID. Fuente: (Louit, 2002)

#### 2.1.4. Políticas de mantenimiento

En la gestión de activos físicos existen las llamadas políticas de mantenimiento, las que buscan diseñar planes de mantenimiento óptimo y determinar los recursos necesarios para un correcto desempeño de los equipos. En este contexto, existen 2 políticas de mantenimiento que han sido ampliamente utilizadas en los últimos años, RCM y TPM (*Total productive maintenance* - Mantenimiento productivo total).

a) RCM

Como metodología se basa en la importancia de determinar las potenciales fallas (causas raíz) y definir la mejor acción de control o corrección con el objetivo de asegurar la continuidad operacional del equipo de modo de satisfacer la necesidad por la cual han sido adquiridos.

Todo el análisis RCM apunta a generar un plan de mantención proactivo. Es decir, eliminar la causa raíz de las fallas con el fin de extender la vida útil del equipo. Corresponde a la etapa más avanzada de un plan de mantenciones y requiere un alto nivel de madurez en la gestión de activos físicos.

La mantención basada en confiabilidad considera 7 preguntas básicas (Moubray, 2000), relacionadas al FMECA, según las que definen pasos para diseñar un plan de mantenimiento. Estas preguntas se presentan a continuación.

i) Funciones esperadas: ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional?

- Funciones primarias

Corresponden a la razón por la que fue adquirido el activo. Por ejemplo, en relación con velocidad, producción, capacidad de carga, calidad del producto o servicio al cliente.

- Funciones secundarias

Son aquellos atributos del activo que proveen utilidad adicional una vez satisfechas las funciones primarias. Por ejemplo, seguridad, control, contención, confort, economía, eficiencia operacional, cumplimiento de regulaciones ambientales e incluso apariencia del activo físico.

Debido a que el objetivo es responder a las condiciones operativas esperadas por el usuario, resulta fundamental que este sea involucrado en la planificación de RCM.

ii) Fallas funcionales: ¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?

Si un activo cumple más de una función, probablemente exista más de una posible falla que afecte el rendimiento del equipo. Lo anterior, se produce debido a que para cada una de las funciones esperadas puede existir una potencial falla. A estos estados se les conoce como fallas funcionales.

iii) Modos de falla: ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?

Una vez se conocen las distintas fallas funcionales que pueden afectar a un equipo es importante identificar todas las causas que puedan originar dicha falla, estas causas son conocidas como modos de falla (debe incluir no sólo fallas por deterioro o desgaste natural, sino también aquellas relacionadas a errores humanos [operadores y/o mantenedores] y errores de diseño).

iv) Efectos de los modos de falla: ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?

Cada modo de fallas tiene un efecto particular y por ello, es importante entender cómo impacta cada uno. Los efectos deben ser analizados desde diferentes perspectivas, como, por ejemplo: evidencia de la ocurrencia de la falla, ¿amenaza la seguridad o al medio ambiente?, efecto en la producción u operación, daños físicos causados y acciones requeridas para reparar la falla.

v) Importancia de la falla: ¿En qué sentido es importante cada falla?

Las consecuencias de una falla pueden repercutir en la operación de la empresa, pudiendo implicar grandes pérdidas de tiempo y, por tanto, de dinero. Sin embargo, no todas las fallas (o modos de falla) afectan de igual forma al negocio de la empresa. Si se suman al análisis las limitaciones económicas se obtiene la necesidad de la empresa de destinar esfuerzos para corregir aquellas fallas de consecuencias más graves por sobre aquellas de consecuencia leve, dedicando a estas últimas mantenciones

mínimas para que el equipo continúe funcionando (limpieza, lubricación, etc).

Las posibles consecuencias son clasificadas por RCM según:

- Consecuencia de fallas ocultas  
No tiene un impacto directo, pero exponen a la organización a fallas múltiples con consecuencias serias y hasta catastróficas.
- Consecuencias ambientales y para la seguridad:  
Puede que cause daño o la muerte a alguna persona. Tiene consecuencias ambientales si infringe alguna normativa o reglamento corporativo, regional, nacional o internacional.
- Consecuencias operacionales  
Si tiene un efecto en la producción (cantidad, calidad del producto, atención al cliente, o costo operacional adicional al de la reparación misma).
- Consecuencias no-operacionales  
No afectan la seguridad ni la producción, sólo implican el costo directo por concepto de reparación.

Estas definiciones de consecuencias permiten incluir dentro de los objetivos del mantenimiento objetivos operacionales, ambientales y de seguridad, con lo que se promueve el uso de KPI's cruzados.

vi) Acciones proactivas: ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?

RCM indica que las acciones de mantención pueden llevarse a cabo previo a la falla (mantención proactiva) o posterior a la falla (mantención reactiva) (Figura 2-5).

La mantención proactiva, corresponde a un concepto amplio que engloba a la mantención preventiva, predictiva (basada en condiciones) y a la búsqueda de causa raíz de las fallas. Esta última lleva la mantención a un nuevo nivel de eficiencia debido a que a diferencia de la mantención

preventiva-predictiva no se enfoca en el efecto, sino que se busca eliminar la causa raíz de la falla de modo que esta no llegue a ocurrir.

El mantenimiento preventivo considera tanto las tareas de reacondicionamiento como las de sustitución cíclica. La primera implica reparar un componente o conjunto antes de un límite de edad determinado sin importar su condición en ese momento, mientras que la segunda bajo las mismas condiciones, implica su reemplazo. Este mecanismo carece de sentido cuando se trata de patrones de falla que no dependen de la edad del componente, en estos casos se desarrolla el mantenimiento basado en condiciones.

Este último se basa en el hecho de que la mayoría de las fallas dan señales (advertencias) de que están por ocurrir. Estas advertencias se denominan fallas potenciales, es decir, condiciones físicas identificables que indican que una falla funcional está por ocurrir o están en el proceso de ocurrir. Para ello, se utiliza como base el monitoreo de condiciones (MONCON). Si una tarea preventiva es técnicamente factible o no, está determinado por las características técnicas de la tarea y de la falla que pretende prevenir. Si es conveniente o no, depende de la manera en que maneja las consecuencias.

vii) Acciones reactivas: ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una acción proactiva adecuada?

Corresponden a aquellas acciones que se realizan directamente sobre el estado de falla. Se llevan a cabo cuando no es posible identificar una tarea según condición efectiva. Incluye la búsqueda de fallas, la mantención *design-out* (cambio de diseño) y la mantención correctiva.

Un resumen general del proceso de evaluación de acciones de mantención según el tipo de falla se muestra en la Figura 2-5.

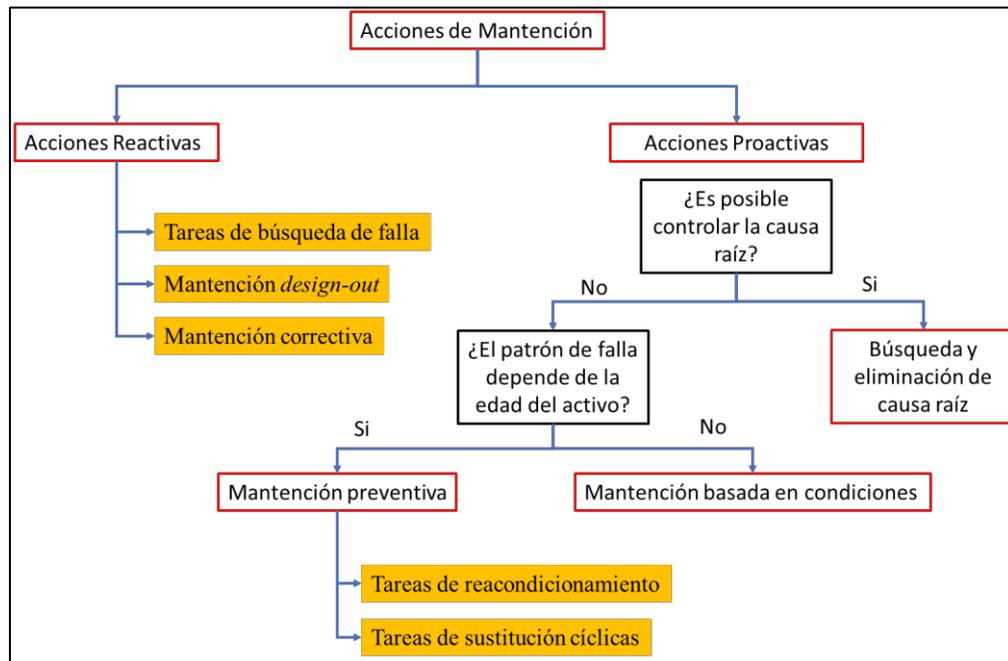


Figura 2-5: Desglose de acciones de mantenimiento. Fuente: Adaptado de Moubray (2000).

## b) TPM

Otra política de mantenimiento que permite mejorar la disponibilidad operativa de los camiones corresponde a TPM, la cual pone énfasis en la polivalencia de los operadores, con lo que aparece la figura del operador-mantenedor. Esto implica que con miras a reducir el TMR (Tiempo medio para reparar - MTTR, *mean time to repair*) del equipo, el operador del vehículo debe tener la capacidad de detectar fallas menores, ya sea para repararlas *in situ*, cuando es posible, o para avisar a los encargados de mantenimiento con un primer diagnóstico de lo que está sucediendo con el equipo.

Lo anterior, permitirá que todos los colaboradores se preocupen de cuidar el OEE (*Overall Equipment Effectiveness* – Eficacia general del equipo) de la operación minera.

El OEE corresponde a uno de los KPI más utilizados en la industria cuando se busca implementar organizaciones orientadas a procesos y no a funciones, lo que permite eliminar los silos administrativos. Esto es posible gracias a que se hace cargo de la

disponibilidad de los equipos, de la utilización y rendimiento de estos (tasa de desempeño). Es decir:

$$OEE = Disponibilidad * Utilización * Rendimiento$$

(2.1)

Como regla general, se considera que un proceso de calidad media presenta un OEE de 30% - 45%, mientras que uno de calidad internacional presenta un OEE > 85%. (Cruelles, 2010)



Figura 2-6: Modelo ASARCO y OEE. Fuente: Moubray (2000).

c) Políticas desarrolladas en caso de estudio

En la Mina estudiada, se lleva a utilizar un sistema de gestión desarrollado por la empresa, el cual considera diferentes aspectos de RCM, TPM y *Lean Management*. Lo anterior, se expresa en la utilización de las diferentes acciones de mantenimiento propuestas previamente y en la consideración de la evaluación del operador como primer aviso de falla. Sin embargo, existen oportunidades de mejora como las que se describen en detalle más adelante.

### 2.1.5. Gestión y ciclo de mejora continua de la mantención

La planificación y gestión a nivel estratégico de la mantención de equipos mineros propuesta por Viveros et al. (2013) permite la integración de las políticas antes mencionadas. Sin embargo, para que esta estrategia sea exitosa es necesario llevar las acciones a un nivel táctico - operacional, por lo que Viveros propone un modelo basado en un ciclo de mejora continua (Figura 2-7), el cual corresponde a la serie de procedimientos y actividades que buscan reducir el riesgo negocio asociado a las fallas de los equipos, promoviendo su continuidad operacional a la vez que se analiza el desempeño en busca de oportunidades de mejora.

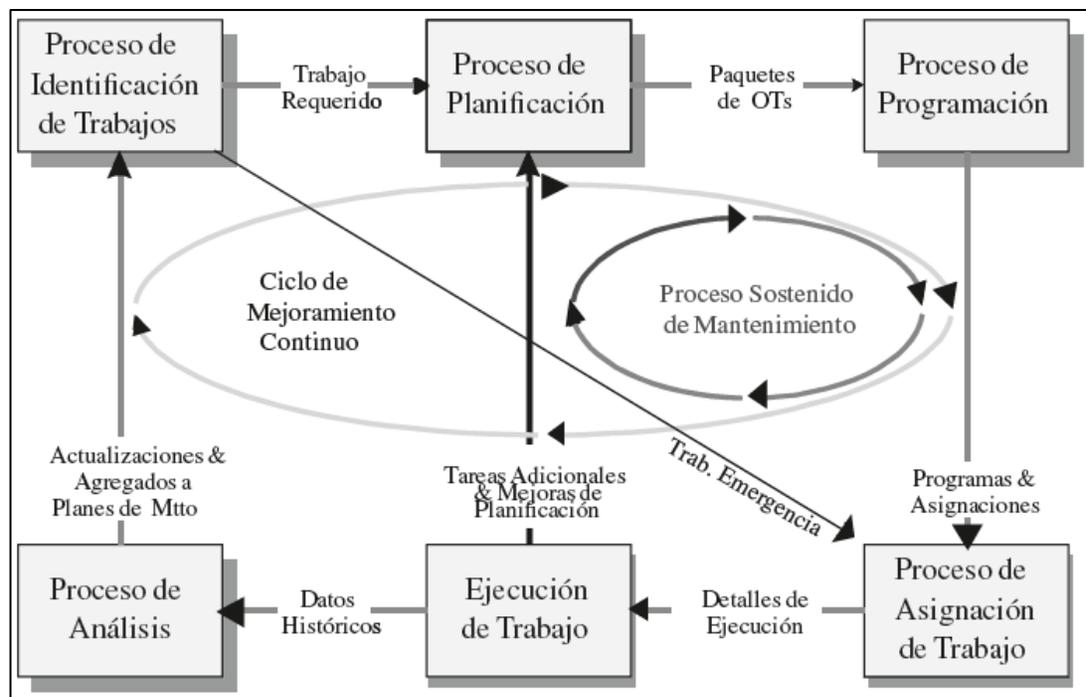


Figura 2-7: Ciclo de mejora continua en mantenimiento a nivel operacional. Fuente: (Viveros et al, 2013)

En particular, la etapa de ejecución está compuesta por varias actividades/tareas y a lo largo de los años se han considerado diferentes KPI's para medir la eficiencia del proceso. Selvik & Ford (2017) explican en detalle cómo han evolucionado estos KPI's en "*Downtime Terms and Information used for Assessment of Equipment Reliability and Maintenance Performance*".

En particular, los más utilizados corresponden al tiempo medio ente fallas (TMEF - MTBF, *Mean time between failure*), asociado a la confiabilidad del equipo y el tiempo medio para reparar (TMPR – MTTR, *Mean time to repair*), asociado a la mantenibilidad del equipo.

Para efectos de este estudio, es importante mencionar las dimensiones o etapas que componen el MTTR o MTTRes (*mean time to restoration* – Tiempo medio para restaurar), como lo Selvik & Ford (2017). Estas se presentan en la Figura 2-8.

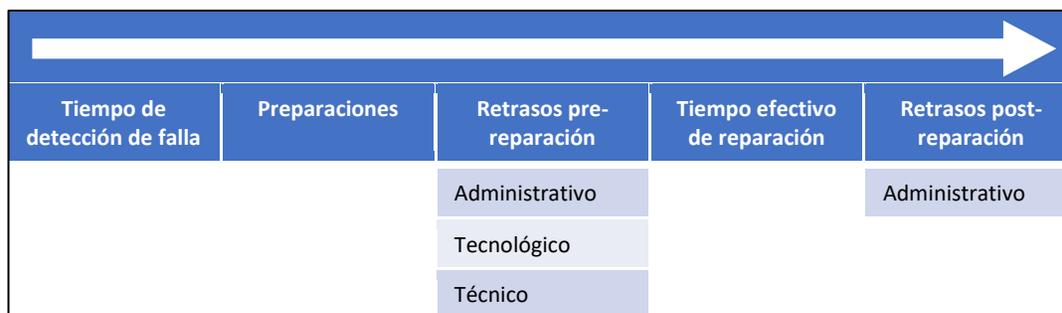


Figura 2-8: Etapas del proceso de ejecución de mantenimiento. Fuente: Elaboración propia en base a Selvik & Ford (2017).

Una parte fundamental de la mejora continua es el proceso de análisis, durante el cual, a partir de la revisión de data histórica se busca entender la efectividad de las acciones de mantenimiento implementadas y la conformidad de los resultados con lo planificado.

Cada año las empresas invierten millones en la planificación de la mantención de activos mineros, sin embargo, con el tipo de información y los métodos de análisis utilizados se vuelve complejo entender cuál es la causa de las ineficiencias a nivel operativo y, por tanto, la tarea de definir qué hacer para mejorar los procesos se dificulta cada vez más.

Quizás, una de las mayores deficiencias en este sentido es buscar resolver problemas operativos basándose en datos *macro* que carecen de una mirada operativa como lo son el TMPR y el TMEF, KPI's que, si bien resultan fundamentales en el análisis de las fallas, no permiten por sí solos dar respuestas a las problemáticas operativas que implica la implementación de los planes de mantención.

#### **2.1.6. Priorización de fallas**

A continuación, se presentan las principales métricas utilizadas en la industria para la priorización de fallas.

##### a) Análisis de confiabilidad

La confiabilidad de los equipos ha sido ampliamente utilizada como base para priorizar y desarrollar la planificación de las mantenciones. Es posible hacer un análisis de confiabilidad por componentes y por subsistemas. Para ello, se calcula la confiabilidad de cada componente como:

$$R(\%)_i = [1 - F(t)_i] * 100, i = 1, \dots, n$$

(2.2)

Luego, la confiabilidad de cada subsistema está dada por la multiplicación de la confiabilidad de cada uno de sus componentes, es decir,

$$R(\%)_{SS} = \prod_{i=1}^n R(\%)_i$$

(2.3)

b) Índice de criticidad

Dada la importancia de la confiabilidad como indicador en el análisis de la criticidad de los equipos, Morad et al (2013) propone utilizar un índice definido como la probabilidad de que el componente  $i$  sea crítico para la falla del sistema. Este índice puede ser expresado como:

$$I_{R_i}(t) = \frac{\delta R_S(t)}{\delta R_i(t)}$$

(2.4)

Donde  $R_S$  es la confiabilidad del sistema y  $R_i$  corresponde a la confiabilidad del componente  $i$ . De este modo, corresponde a un índice de confiabilidad relativa.

c) Histograma de Pareto

Esta regla, que ha demostrado ser aplicable a diversos campos de estudio (Leavengood & Reeb, 2002), postula que en general el 20% de las causas, generan el 80% de los efectos. En la ingeniería, se utiliza comúnmente para identificar el 20% las fallas responsables de la mayoría (80%) del tiempo fuera de servicio (*Downtime*), o de los mayores costos de mantención, de los equipos. Esta segmentación permite direccionar los esfuerzos para mejorar la confiabilidad, disponibilidad o costo de mantención de los equipos.

En la Figura 2-9, se puede apreciar un ejemplo utilizado por Knights (2005), en donde se utiliza el tiempo fuera de servicio como criterio para generar el histograma de las fallas.

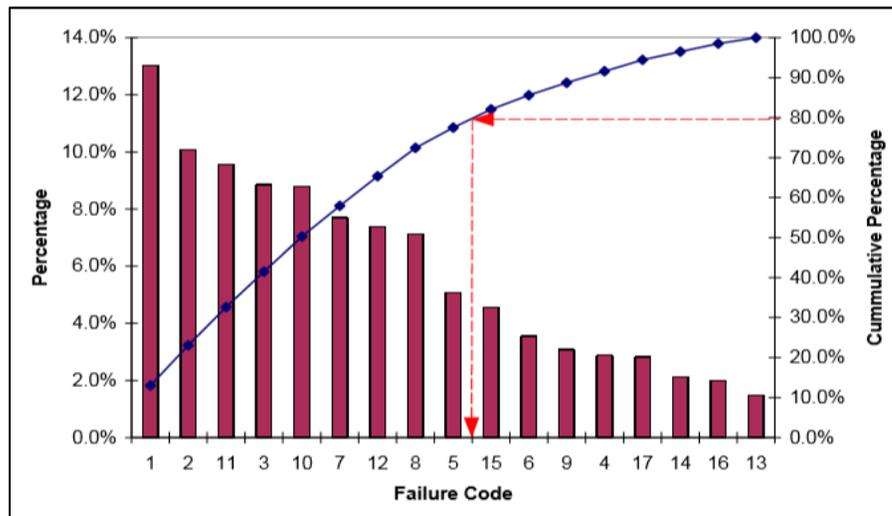


Figura 2-9: Histograma de Pareto de tiempo fuera de servicio de una pala de carguío.  
Fuente: (Knights, 2005).

El tiempo fuera de servicio se define como,

$$TFS_i = n_i * TMPR_i$$

(2.5)

Donde  $n_i$  corresponde a la cantidad de fallas del componente  $i$ , mientras que  $TMPR_i$  corresponde al tiempo medio para reparar el componente  $i$ .

A pesar de las ventajas que el uso del Histograma de Pareto aportó a la gestión de equipos, no permite caracterizar de manera independiente las variables dominantes que afectan el tiempo fuera de servicio de los equipos, es decir, la frecuencia de las fallas y el tiempo medio para reparación. Por ello, no logra definir cuál es la causa real de la falla; no permite generar una lista única de fallas críticas y no permite diferenciar entre una falla que demora mucho en reparar y una falla de rápida solución, pero alta frecuencia.

#### d) Análisis de Jack Knife

El análisis de Jack Knife, permite incorporar los elementos que Pareto no alcanza a incluir al análisis sin perder la facultad de ranquear las fallas más relevantes, lo que facilita la evaluación de causa raíz de las más críticas. Además, este tipo de gráfico entrega una guía visual para identificar problemas de confiabilidad, mantenibilidad

y disponibilidad en el sistema. Lo anterior, permite que el encargado de la gestión de equipos mineros pueda reorientar la prioridad de su planificación en función del precio del mineral (Knights, 2005).

El gráfico de Jack Knife, corresponde a una nube de puntos logarítmica, lo que permite dividir el espacio en cuatro cuadrantes. Cada punto de la nube corresponde a un tipo de falla, los que se grafican en función de su frecuencia y su Tmpr.

Así como se reconoce el Tmpr como medida de mantenibilidad, se presenta el Tiempo medio entre fallas, TMEF, como la medida de confiabilidad, lo que se expresa como:

$$TMEF = \frac{\text{Tiempo}_{operativo}}{\sum_i n_i}$$

(2.6)

Luego, en base a estas medidas de desempeño, se calcula la disponibilidad de los equipos según la expresión,

$$Disponibilidad = \frac{TMEF}{TMEF + Tmpr}$$

(2.7)

Para efectos del gráfico de Jack Knife, se puede calcular la curva de iso-indisponibilidad como,

$$Iso - Indisponibilidad = Limite_{Tmpr} * Limite_n$$

(2.8)

De este modo, los cuadrantes pueden ser divididos como se presenta en la Figura 2-10, en donde se pueden diferenciar problemas de confiabilidad (A), mantenibilidad (B) y disponibilidad (C).

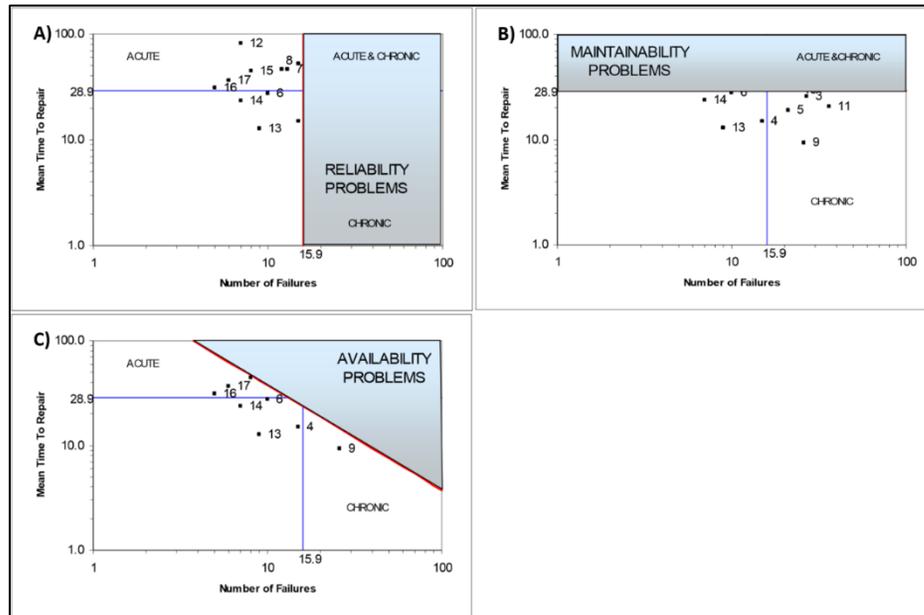


Figura 2-10: Segmentación de cuadrantes en problemas de (A) confiabilidad, (B) mantenibilidad y (C) disponibilidad. Fuente: (Knights, 2005).

### 2.1.7. Limitantes y oportunidades futuras

Galar, et al (2014) indica en su investigación “*Fusion of operations, event-log and maintenance data: a case study for optimizing availability of mining shovels*” que es útil hacer un análisis de Pareto de las fallas, sin embargo, también es importante lograr un análisis más específico que permita filtrar las fallas según equipo u operador y poder determinar si la causa de la falla corresponde a mal uso o al deterioro natural del equipo.

Como se mencionó previamente, para maximizar el beneficio de la mina, es imperativo que en cada etapa del proceso minero el equipo esté operativo sin interrupciones previsibles o innecesarias, sin embargo, es común que los recursos humanos de los departamentos de mantención sean subutilizados debido al ambiente “apaga incendios” que domina la industria (Galar et al., 2014).

Ante esto, una mejor planificación y evitar llegar a situaciones de “incendios” o emergencias resultará en un mejor uso de los recursos y mayor disponibilidad de los activos.

Históricamente, la industria minera ha encontrado en la reportabilidad de los datos resultante de sus operaciones un desafío propio de la cantidad de datos que circulan en la mina y la dificultad de lograr un registro oportuno y de calidad. Frente a esta realidad, el desarrollo de la ciencia de datos (*data science*) se abre como una oportunidad no solo para mejorar la calidad y el control de los datos, sino también para integrar al análisis archivos de data antigua.

Arif-Uz-Zaman et al (2017) plantea que ante la falta de una base de datos consolidada que permita hacer un seguimiento intuitivo de los procesos de mantención, es posible utilizar técnicas como *text mining* para poder conectar las bases de datos (*work orders* y *downtime data*) de modo de lograr visualizar en una sola base de datos cuando falla un equipo y el motivo de la falla. Esta solución permite integrar al análisis bases de datos antiguas, lo que en la actualidad se soluciona con la utilización de *ID numbers*.

Sin embargo, a pesar de que hoy en día exista la posibilidad de hacer un seguimiento de los procesos de mantención mediante *ID numbers*, a menudo esto se realiza mediante el análisis de planillas que distan mucho del proceso mismo. Es decir, se busca solucionar problemas reales de la operación mediante metodologías que no permiten visualizar de forma rápida e intuitiva lo que realmente está sucediendo en el proceso.

Lo anterior, condiciona no sólo el proceso mismo de mantención de equipos mineros sino también la interacción entre el área de mantenimiento y las áreas de operaciones, planificación y abastecimiento, afectando de este modo el desempeño global de la Mina.

Una posible solución de este dilema de la gestión es la implementación de Minería de Procesos para dar al análisis una mirada desde la realidad de los procesos existentes y no sólo un análisis aislado de datos y estadísticas.

## **2.2. Minería de Procesos**

### **2.2.1. Ciencia de los datos y Ciencia de los Procesos**

Para entender el trabajo propuesto es necesario entender primero la disciplina de “Process Mining” (Minería de Procesos). Van der Aalst, uno de los investigadores referentes en el área, define en su libro “*Data science in action*” (2016), la Minería de Procesos, como el puente entre las áreas de *Data Science* (ciencia de los datos) y *Process Science* (ciencia de los procesos).

Se puede entender *Data Science* como:

“... un campo interdisciplinario llamado a convertir la data en valor real. La data puede estar estructurada o sin estructura, pequeña o grande, estática o en *streaming* (transmisión directa). El valor es entregado en forma de predicciones, decisiones automatizadas, modelos aprendidos a partir de los datos, o cualquier tipo de *insight* (revelación) proporcionado mediante la visualización de la data. Incluye la extracción, preparación, exploración, transformación, almacenamiento y recuperación de datos, así como también, infraestructuras computacionales, varios tipos de minado y aprendizaje, presentación de explicaciones y predicciones, y la explotación de resultados teniendo en cuenta aspectos éticos, sociales, legales y de negocios.” (Van Der Aalst, 2016).

Por tanto, el principal objetivo es convertir los datos en valor para la empresa. Para ello, se responden preguntas que pueden agruparse en cuatro familias base:

- (Reporte) ¿Qué pasó?
- (Diagnóstico) ¿Por qué pasó?
- (Predicción) ¿Qué pasará?
- (Recomendación) ¿Qué es lo mejor que puede pasar?

*Data Science* (ciencia de datos) puede ser entendido como la conjunción de múltiples (sub)disciplinas sobrelapadas, resulta complejo definir límites claros entre las mismas y estos parecen variar en el tiempo. Es posible ilustrar un ejemplo al considerar las diferencias entre *data mining* (la minería de datos) y *machine learning* (aprendizaje automático) o estadística. Sus raíces son muy diferentes, sin embargo, hoy en día se encuentran entrelazadas. Las principales (sub)disciplinas se presentan en la Figura 2-11.

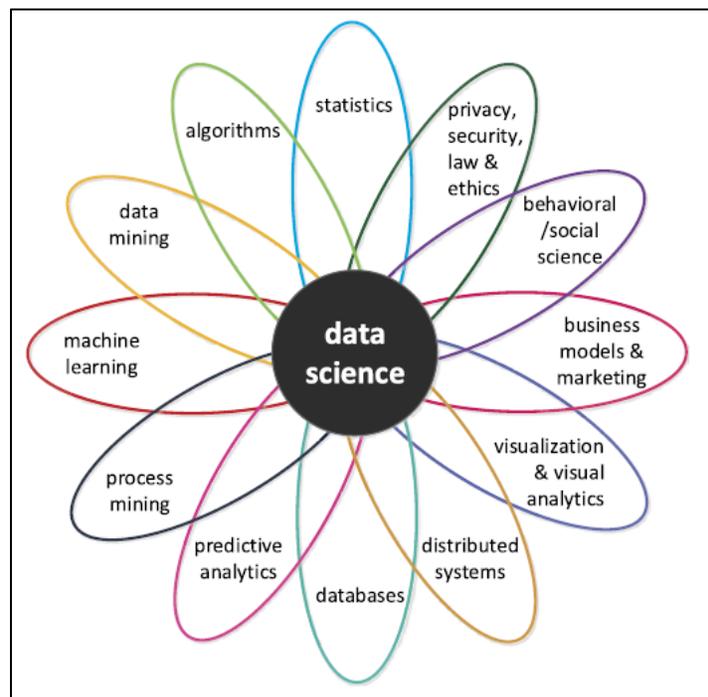


Figura 2-11: (sub)disciplinas que conforman *Data Science*. Fuente: (Van Der Aalst, 2016).

Por otro lado, se desarrolla lo que hoy se conoce como *Process Science* (Ciencia de Procesos), lo que corresponde a un conjunto de (sub)disciplinas que combinan el conocimiento de las tecnologías de la información con el proveniente de las *management sciences* (Ciencias de administración y gestión) para mejorar y hacer andar procesos operacionales. Las principales (sub)disciplinas se presentan en la Figura 2-12.

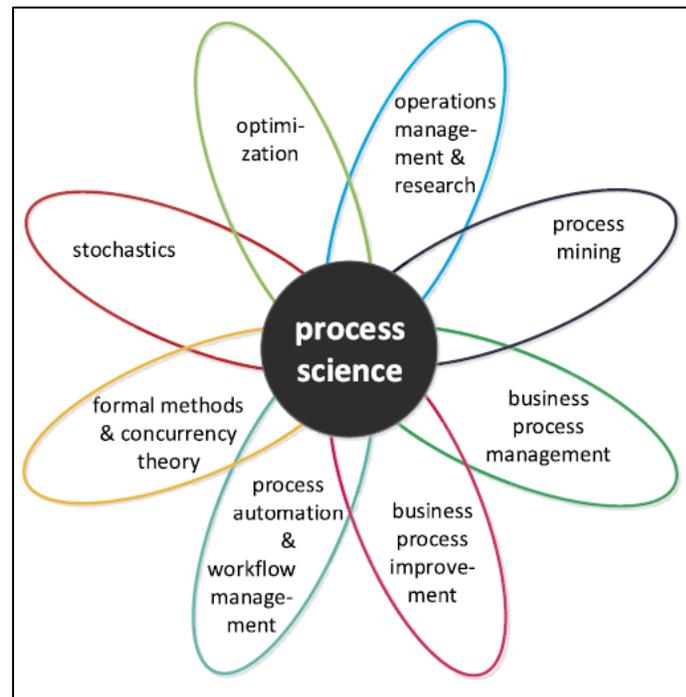


Figura 2-12: (sub)disciplinas de *Process Science*. Fuente: (Van Der Aalst, 2016).

La Minería de Procesos se considera dentro de las *Data Science* (Ciencias de Datos) dado que agrega una perspectiva de proceso a lo propuesto por *machine learning* (aprendizaje automático) y *data mining* (minería de datos). La principal característica es que busca la confrontación entre los datos de los eventos (comportamiento observado) y los modelos de procesos (usando notaciones tales

como las Petri Nets o BPMN). Por ejemplo, los modelos de procesos se pueden descubrir desde la data o los datos de los eventos pueden ser recreados en modelos para analizar el cumplimiento y rendimiento.

Sin embargo, la minería de procesos adiciona un componente de procesos al análisis clásico de datos. Lo anterior se puede ilustrar al comparar la minería de procesos con la minería de datos, si bien ambos se basan en el uso de datos, las técnicas de minería de datos en general no se enfocan en el proceso ni en la data de eventos. En realidad, las filas (instancias) y columnas (variables) en una base de datos podrían no significar nada dado que no es un requisito para la aplicación de minería de datos. En cambio, para las técnicas de minería de procesos, se asumen datos de eventos donde los eventos se refieren a instancias y actividades de procesos. Más aún, los procesos están ordenados y el interés está puesto en procesos *end-to-end* (con inicio y fin) más que en patrones locales.

Por otro lado, también se puede considerar parte de las *process science* (ciencias de procesos). Por ejemplo, como se mencionó, las técnicas de Minería de Procesos permiten descubrir modelos de procesos a partir de los datos reales, lo que puede ser utilizado para analizar cuellos de botella, actividades recurrentes o secuencias mal ejecutadas y se pueden revelar los efectos de no cumplir con el plan (chequeos de conformidad) lo que no es abarcado por las técnicas tradicionales de minería de datos. Si se compara con BPM (*Business Process Model*), se puede ver que existe una diferencia dado que el foco no está en modelar los procesos, sino en explotar el valor de la *event data* (datos de eventos).

Tal como se presentó, la Minería de Procesos reúne elementos del análisis de procesos basados en modelos tradicionales y de las técnicas de análisis centradas en datos, por lo que se puede ver como el puente entre las ciencias de datos y las ciencias de procesos, como se aprecia en la Figura 2-13.

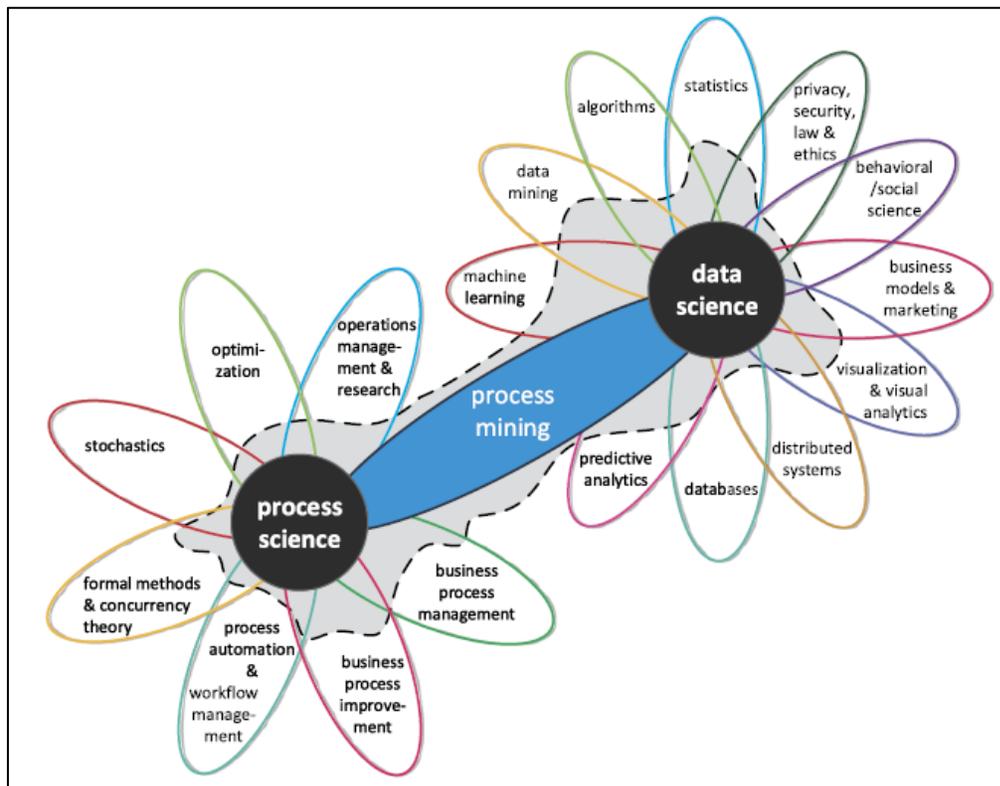


Figura 2-13: Minería de Procesos como puente. Fuente: (Van Der Aalst, 2016).

La minería de procesos busca la confrontación entre los datos de eventos (comportamiento observado) y modelos de procesos (hechos de forma manual o descubiertos de forma automática). Los enfoques tradicionales de las ciencias de datos son proceso-agnósticas. *Data Mining*, estadísticas y técnicas de *machine learning* no consideran en su análisis modelos de procesos *end-to-end*. Por otro lado,

el enfoque de las ciencias de procesos es proceso-céntrica y a menudo se enfocan más en el modelo que en aprender de los datos reales.

Si bien la minería de procesos ha emergido recientemente como subdisciplina de las ciencias de datos y procesos, ha sido ampliamente estudiada y sus técnicas pueden ser aplicadas para cualquier tipo de proceso operacional (organizaciones y sistemas).

Tal como se documenta en *EEE Task Force On Process Mining* (<https://www.tf-pm.org/resources/casestudy>), existen varios ejemplos de posibles aplicaciones en diversas industrias, entre los que se encuentra el analizar procesos de tratamiento en hospitales; mejorar procesos de servicio al cliente en corporaciones multinacionales; entender el comportamiento de búsqueda de clientes en un sitio web de reservas; analizar fallas en un sistema de manejo de equipaje; y mejorar la interface de usuario de una máquina de rayos-x. Como se ve, las aplicaciones son diversas, sin embargo, lo que todas tienen en común es que el comportamiento dinámico que presentan requiere ser relacionado e interpretado mediante modelos de procesos.

A pesar de lo expuesto y del hecho de que la minería de procesos pertenezca a dos mundos cuyas disciplinas se traslapan y los límites son difusos, en muchos casos este llega a ser un tema de definición. Algunas personas consideran que la minería de procesos corresponde a una rama de la minería de datos, sin embargo, es importante considerar que la literatura clásica de minería de datos no considera un foco en los procesos, por lo que la minería de datos clásica no puede responder preguntas de desempeño o conformidad del proceso.

### 2.2.2. Estado del Arte – Minería de procesos

#### a) Expansión de Minería de procesos en diversas áreas

*Process Mining* es una disciplina que ha tenido una gran expansión en los últimos años. Desde su introducción se ha popularizado y validado en diversas áreas (construcción, telecomunicaciones, informática, medicina, aviación, etc.). Esto ha permitido el desarrollo y mejora constante de *softwares* especializados. Entre las herramientas más reconocidas se encuentran de código abierto como PROM (Academic), o de tipo comercial como DISCO (Fluxicon), CELONIS PM (Celonis), MINIT (Minit), ARIS PM (Software AG), PERCEPTIVE (Hyland) y RIALTO (Wodan Group) (Brzychczy y Trzcionkowska, 2017; Bru et al, 2018).

#### b) Oportunidad - Integrar mirada de procesos

Este *boom*, ha sido impulsado por la oportunidad de integrar una mirada de procesos, sustentada en datos, al tradicional análisis estadístico, junto con la posibilidad de incorporar análisis en base a *data mining* y *machine learning*, lo que ha permitido a variadas empresas a lo largo del mundo mejorar la eficiencia de sus procesos.

#### c) Investigaciones de PM entre 2010 y 2019

En (Kulakli y Birgun, 2021), se analizaron 35 investigaciones llevadas a cabo entre el 2010 y el 2019, a partir de lo cual demuestran que, a pesar de la expansión de la minería de procesos en variadas industrias, esta presenta un retraso en campos de investigación como la ingeniería industrial y aquellos relacionados a la gestión. Sin embargo, en este mismo período se evidencia una tendencia al alza (Figura 2-14). Cabe mencionar que las investigaciones en estos campos han sido lideradas por países como Korea del sur, EEUU, Bélgica y China. En cuanto a los centros de estudios que más han impulsado la disciplina destacan la Eindhoven University of Technology, la Hasselt University y la Kyung Hee University entre otras.

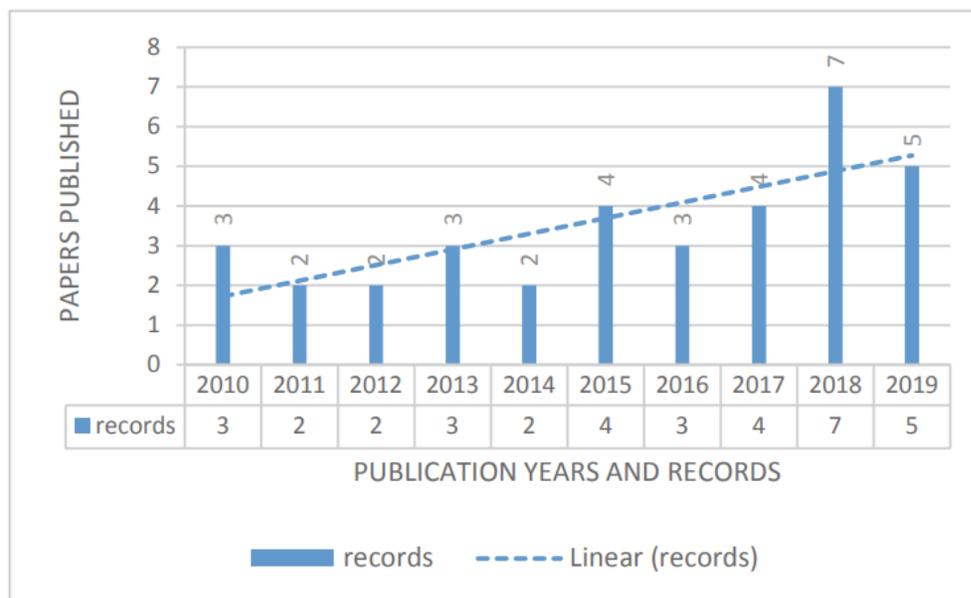


Figura 2-14. Registros de publicaciones por años. Fuente: (Kulakli, 2021).

d) Investigaciones de PM en Minería subterránea

En específico, respecto al área de minería y en particular la minería subterránea existe un amplio desarrollo de la investigación en minería de datos (DM), especialmente en los últimos 5 años, lo que ha sido apalancado por el *boom* de información derivada del arribo de la tecnología 4.0. Sin embargo, este desarrollo no se ha reflejado en la minería de procesos (PM).

Brzychczy (2019) realizó una investigación que indica que hasta fines de 2018 sólo se han publicado 5 investigaciones de PM en Minería subterránea y a la fecha el autor de esta investigación no ha encontrado más de 10 estudios referentes al área de implementación.

Las principales causas de esto son, en primer lugar, poco conocimiento de las herramientas de minería de procesos y sus oportunidades y, en segundo lugar, que, a pesar de la abundancia de información, se presenta una escasez de *logs* de eventos apropiados para el modelado y análisis directo con PM. A pesar de lo anterior, se prevé que al igual que sucedió con DM en minería, esta tendencia continúe

aumentando en la medida que se reconozca la disciplina y las oportunidades de mejora que puede entregar a la industria minera.

Dentro de los estudios realizados en esta materia se puede mencionar el realizado por Brzychczy y Trzcionkowska (2017) donde presenta las oportunidades de utilizar diferentes técnicas de PM para la gestión de riesgos y procesos en minería subterránea, aplicado al caso de una operación de soporte mecanizado de techo.

En los *papers* (Brzychczy y Trzcionkowska, 2018; Trzcionkowska y Brzychczy, 2018) se presenta la creación de log de eventos a partir de datos de bajo nivel de sistemas de monitoreo mineros y aspectos prácticos de la creación de logs de eventos para modelado de procesos industriales, respectivamente.

Brzychczy y Trzcionkowska (2019) presentan un caso de implementación de una metodología para generar logs de eventos apropiados a partir de sensores disponibles en minería subterránea, dado el bajo nivel de abstracción de los datos disponibles en los sistemas de monitoreo en Longwall.

He et al (2019), propone el uso de PM para estudiar y mejorar la respuesta de equipos de rescate ante explosiones fatales provocadas por gases en minería de carbón en China.

En 2020, Szpyrka et al presentan la implementación de una metodología de pre-proceso de datos para la generación de un log de eventos a partir de datos de bajo nivel en un proceso de *Longwall* y la aplicación de *Conformance Checking* del proceso.

Brzychczy et al (2020) propone un caso de estudio con la utilización de PM en el proceso de una máquina empernadora de techo en minería subterránea.

En estos estudios los focos de investigación considerados fueron el pre-proceso de datos para generar logs de eventos a partir de fuentes de datos de bajo nivel de abstracción y el análisis de procesos realizados en minería subterránea mediante técnicas como *Conformance checking*, *Discovery* y *Enhancement*.

e) Oportunidad de implementación en minería

Hasta la fecha, el autor desconoce estudios previos de aplicación de minería de procesos en la industria minera además de los expuestos, en específico, no se encontró aplicaciones en análisis de optimización de ciclos de mantención minera. La implementación de la minería de procesos a la gestión de activos mineros podría generar ventajas como la posibilidad de entregar una visión clara de los procesos llevados a cabo en la realidad, sus principales defectos respecto a lo esperado en los modelos, o la posibilidad de ordenar las fallas según equipo u operador y aportar a investigaciones orientadas a entender si la causa de la falla corresponde a mal uso o al deterioro natural del equipo. También sería posible determinar si la demora en la reparación de un equipo corresponde a causas técnicas, logísticas, falta de repuestos en abastecimiento o reprocesos, etc.

Existe una oportunidad latente de desarrollar la disciplina en minería y con ello, mejorar el análisis de procesos y la planificación de la gestión minera.

f) Limitaciones

Este avance y desarrollo, sin embargo, no está exento de desafíos y limitaciones, entre las cuales se considera la necesidad de datos en cantidad y calidad apropiada, personal capacitado para desarrollar áreas de análisis de procesos con minería de procesos y la implementación y gestión del cambio necesarios para una correcta adopción.

Resulta importante entender que como en toda disciplina de *Data Science*, la calidad del análisis resultante depende de la calidad de la información de entrada. Este punto cobra relevancia para el análisis propuesto en este estudio debido a la escasa cantidad y calidad de datos que permitan desarrollar una investigación óptima. Es de esperar que en la medida que se demuestre el aporte de la disciplina a la industria junto con una mayor accesibilidad a nuevas tecnologías y mejores herramientas de recopilación de datos, esto deje de ser una limitante.

Por otro lado, la implementación y desarrollo de una nueva disciplina, requiere personal calificado en el uso y análisis, capaz de desarrollar una nueva forma de

estudiar los procesos. Lo anterior, conlleva un desafío intrínseco a la adopción de nuevas tecnologías, considerando no sólo la implementación de minería de procesos, sino también de tecnologías que permitan la recolección confiable de los datos. Lo anterior, levanta la necesidad de contar con una correcta gestión del cambio, donde se considere un proceso de incorporación tecnológica paulatina, con períodos de capacitación adecuados.

### **2.3. Descripción y selección de DES**

#### **2.3.1. ¿Qué es DES?**

Para comprender lo que se conoce como Simulación de eventos discretos (DES – *Discrete Event Simulation*), es necesario entender que una simulación corresponde a una técnica numérica que involucra relaciones lógico-matemáticas para describir el comportamiento y estructura de un sistema dado sobre diferentes períodos de tiempo.

De este modo, la simulación responde a una amplia gama de métodos que buscan replicar el comportamiento de un sistema real (Sadowski, 1998). Durante las últimas décadas, la simulación se ha popularizado debido a la mayor capacidad de procesamiento de los computadores, permitiendo modelar procesos cada vez más complejos.

Un modelo de simulación se puede caracterizar como estático o dinámico según la influencia del tiempo en el resultado del modelo, como continuo o discreto según si el cambio de estado se produce de forma continua o en puntos de tiempo discreto, y como determinístico o estocástico dependiendo de si los cambios en el modelo son conocidos o aleatorios.

Según lo explicado, la DES corresponde a una simulación dinámica en la que el sistema es modelado como una secuencia de eventos ocurridos en puntos específicos de tiempo según distribuciones aleatorias.

El principal objetivo de esta disciplina es modelar un sistema para facilitar la evaluación del comportamiento, ante diferentes escenarios con variables fluctuantes, con el fin de optimizar la capacidad de análisis y toma de decisiones que se desprende.

Un modelo simulado habitualmente está compuesto por:

- Entidades: “objeto” que se desplaza a través del modelo, cambia de estado y afecta o es afectado por otras entidades.
- Atributos: Características que describen a las entidades. Todas las entidades tendrán los mismos atributos, cuyo valor puede variar entre entidades.
- Variables: Se definen para describir el estado de todo el modelo, por ejemplo, el número de entidades o el tiempo actual de simulación.
- Recursos: Elementos usados por las entidades que regulan el flujo de estas a través del proceso.

De forma adicional, los modelos pueden contener módulos que permitan diseñar entornos más complejos, leer información a partir de un archivo o escribir sobre el mismo.

### **2.3.2. Estado del arte- DES**

#### a) Investigaciones en minería – mantención

En la literatura es posible encontrar múltiples estudios relacionados con la aplicación de DES para el análisis de procesos mineros en general y de aquellos

relacionados a la generación de planes de mantención y gestión de activos físicos en particular (Gbadam, 2015).

A pesar de lo anterior, y según conocimiento del autor se evidencia un marcado sesgo hacia estudiar qué reparar y el impacto de los tiempos efectivos de reparación, sin prestar mayor importancia al proceso desarrollado desde que se manifiesta la falla de un sistema o componente hasta que es reparado y el equipo regresa a operación.

Además, en específico, no se encuentra bibliografía respecto al uso de DES para llevar datos de bajo nivel a logs de eventos para el análisis con minería de procesos.

#### b) Comparación con minería de procesos

Debido a que ambas disciplinas, la simulación y la minería de procesos permiten el análisis de procesos, es normal buscar la comparación para entender las ventajas, desventajas o puntos de encuentro.

Quizás las principales diferencias se encuentran en tres puntos, la fuente de datos del modelo representado, la capacidad de evaluar escenarios alternativos y la capacidad de representación gráfica que entregan.

El primer punto diferenciador, es quizás, el más relevante debido a que mientras la simulación trabaja principalmente a partir de distribuciones ajustadas a datos reales, la minería de procesos trabaja a partir de la data real, permitiendo analizar desde el punto de vista de procesos lo que realmente está ocurriendo en el proceso analizado. Es importante mencionar que la simulación también puede utilizar data real, sin embargo, suele consumir mucho tiempo y esfuerzo.

Lo anterior, está relacionado con el segundo punto, dado que la simulación busca analizar diferentes escenarios, resulta útil basarse en distribuciones dada la flexibilidad que entregan para modelar los procesos, sin embargo, si lo que se desea es analizar las diferentes variantes del proceso que se está llevando a cabo, la minería de procesos podría ajustarse de mejor manera a lo requerido.

La tercera gran diferencia dice relación con la capacidad gráfica que hoy en día entregan diferentes programas de simulación para representar los procesos en

cuestión, lo cual se diferencia de la interfaz gráfica de las herramientas de minería de procesos, dado que estos apuntan a que mediante la aplicación de filtros se pueda mostrar de manera sencilla el comportamiento del sistema analizado y no incorpora la posibilidad de representar gráficamente un aeropuerto o entornos animados como si permiten los entornos simulados.

### **2.3.3. Aporte a la investigación**

Sin perjuicio de lo expresado en el punto precedente, este estudio plantea la oportunidad de utilizar ambas disciplinas en conjunto, aprovechando las cualidades de cada una.

Una de las principales limitaciones que se ha encontrado a la utilización de minería de procesos en la industria minera es el bajo nivel de abstracción de las bases de datos disponibles. Si bien, gracias a la irrupción de la tecnología 4.0 cada día se generan grandes cantidades de datos, en general no vienen en un formato apropiado para ser usado en minería de procesos.

Lo anterior, lleva a la necesidad de pre-procesar los datos para llevarlos desde un conjunto de datos de bajo nivel a un log de eventos apropiado para el estudio del proceso observado. Para esta tarea, en algunas investigaciones se ha utilizado una combinación de herramientas de Data Science y juicio experto. En este estudio, se propone la utilización de DES y el juicio experto para pre-procesar los datos y generar un *log* de eventos apropiado para el análisis con minería de procesos.

La utilización de la simulación como sistema habilitante generador de datos permite que se construya un modelo teórico que dé paso al análisis en minería de procesos.

En un escenario ideal, la captura de datos del proceso de mantenimiento de la flota de

equipos LHD sería óptima tanto en cantidad y calidad, es decir, la captura se desarrollaría de forma constante mediante un método de ingreso de información estandarizado y dentro de lo posible, automatizado, de modo que los datos puedan ser procesados de forma directa con minería de procesos.

Sin embargo, la realidad encontrada en el caso de estudio dista del escenario ideal, debido a que no se cuenta con un sistema que capture información del proceso que se desea analizar y la poca información relacionada no cuenta con las condiciones óptimas de calidad y cantidad para formar un log de eventos apropiado.

Ante esto, mediante el *software* de simulación Arena, y el *software Input Analyzer*, es posible caracterizar las distribuciones de tiempo entre falla y tiempo efectivo para reparar a partir de la data existente con el fin de replicar el comportamiento global del proceso. Posteriormente, por medio de la incorporación de distribuciones basadas en el juicio de expertos es posible alimentar al modelo y así complementar las partes del proceso que normalmente no se encuentran controladas, para obtener una base de datos que contemple las diferentes actividades desarrolladas desde que ocurre la falla hasta que el equipo vuelve a operar.

De este modo, este trabajo presenta la primera integración de DES para generar un log de eventos desde data de bajo nivel que permita la implementación de minería de procesos para analizar cuellos de botella e ineficiencias del proceso y su impacto en el ciclo de mantenimiento de los equipos de minería subterránea.

### 3. HIPÓTESIS Y OBJETIVO

#### 3.1. Hipótesis

La hipótesis de este trabajo es que la incorporación de minería de procesos como un estándar en el control del proceso de mantención en minería permite mejorar la calidad de ejecución de los planes de mantención, elevando la disponibilidad de equipos y con ello el *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) de la empresa.

#### 3.2. Objetivo

De acuerdo con la hipótesis propuesta, el objetivo general de esta tesis consiste en demostrar o refutar la utilidad de la minería de procesos como herramienta de optimización del proceso de mantención de equipos mineros.

Dentro de los objetivos específicos se encuentran: 1) Recopilar y filtrar datos para el análisis con DES y Minería de procesos. 2) Simular un sistema de producción y mantención que considere las fallas no planificadas de los diferentes sistemas de un equipo LHD y refleje las actividades realizadas desde la aparición de la falla hasta el regreso a operación del equipo, 3) Estudiar mediante minería de procesos el comportamiento teórico simulado del proceso versus lo planificado, identificando cuellos de botella, reprocesos y causa raíz de fallas, y 4) Desarrollar uno de los primeros *frameworks* de implementación de técnicas de minería de procesos en el ciclo de mantención de equipos mineros a través de la generación de logs de eventos a partir de data de bajo nivel de abstracción.

## **4. MATERIALES Y MÉTODO**

### **4.1. Caso de estudio**

El presente estudio se llevó a cabo a partir de datos recopilados en una importante mina de cobre subterránea de Chile. Esta corresponde al mayor yacimiento de cobre subterráneo del planeta y actualmente cuenta con más de 4.500 kilómetros de galerías subterráneas.

Es relevante para el estudio mencionar que este se desarrolló durante un ciclo de bajo precio del cobre, la importancia de esto se detalla más adelante.

El equipo experto indica que no existe un proceso único definido que deba seguir un equipo en mantenimiento, si bien se está trabajando en formalizar y estandarizar el curso de acción, históricamente el curso de acción ante una falla ha respondido a una decisión personal de los operadores y mantenedores en función del conocimiento traspasado de generación en generación, adoptando prácticas previas y añadiendo nuevas a medida que surge la necesidad.

Existen prácticas en las que se pueden identificar rasgos de políticas de mantención conocidas, como la implementación de RCM para abordar y priorizar fallas a nivel estratégico y de TPM para abordar las fallas a un nivel táctico-operacional lo que en ocasiones incorpora el primer diagnóstico, dado por el operador.

Además, existe un consenso sobre la necesidad de eliminar los silos históricos y promover el trabajo conjunto de mantenimiento, operación, planificación y abastecimiento para lograr mejores resultados y trabajar no en función del logro individual sino del logro colectivo, teniendo como norte el negocio minero.

Aun cuando actualmente no existe un estándar completamente desarrollado, a partir del testimonio de los trabajadores es posible construir lo que podría llamarse, el modelo ideal del proceso de mantenimiento. A continuación, se presenta dicho modelo.

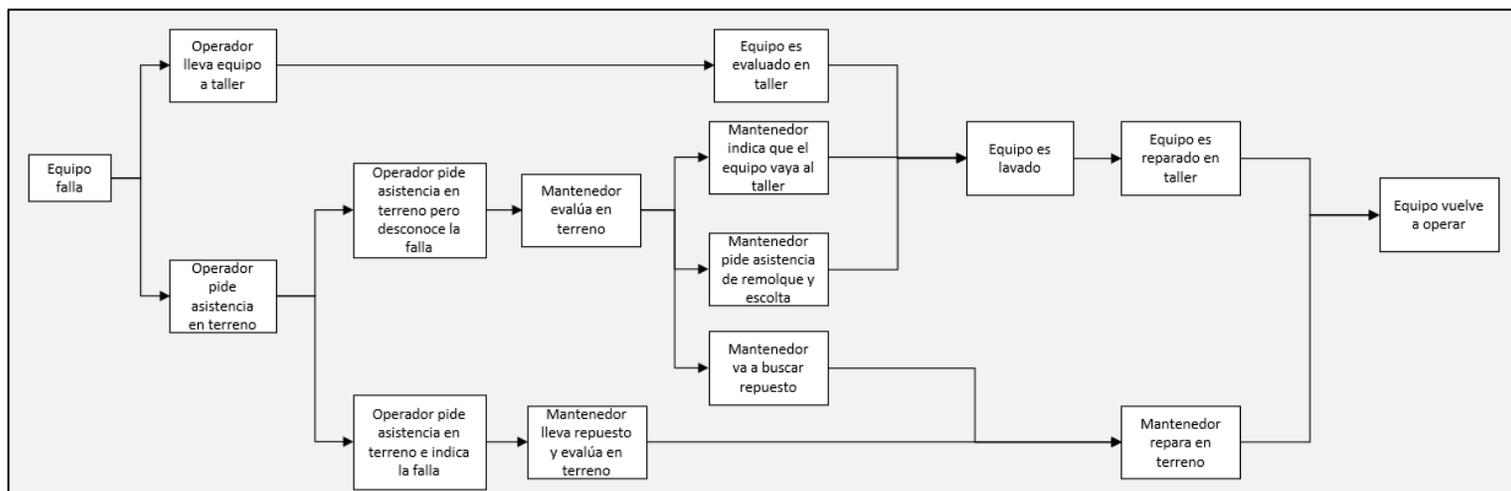


Figura 4-1: Flujo ideal de mantenimiento de equipos LHD, construido en base a juicio experto. Fuente: (Elaboración propia).

El modelo desarrollado se realizó a partir de los datos obtenidos de las Bases de datos presentes en SAP (*Software* de gestión de sistemas, aplicaciones y productos) de la mina. En específico, se utilizaron las bases de datos correspondientes a Órdenes y Avisos de producción y mantenimiento de los equipos LHD.

De acuerdo con esta información, se estimaron los parámetros necesarios para generar un modelo que permita replicar los ciclos de operación y mantenimiento de los equipos. Posteriormente, mediante entrevistas con expertos del área se definieron distribuciones y parámetros que permitieron ampliar el modelo para replicar el proceso de mantenimiento desde la falla hasta el regreso a operaciones. Para modelar

este sistema se utilizó el *software* Arena, con licencia facilitada por la empresa REDCO.

Como resultado de este modelo, se obtuvieron los datos de entrada que conforman el *log* de eventos. Se utilizó el *software* DISCO, con el que se analizó la realidad observada en el proceso de mantención de equipos y las oportunidades de mejora detectadas.

#### 4.2. Enfoque solución

Para abordar el desafío propuesto, se considerarán cinco macro etapas: preparación de datos, definición y caracterización de los sistemas estudiados, modelo base de simulación, modelo ampliado de simulación, y modelo y análisis con minería de procesos. Estas macro etapas a su vez se pueden dividir en diez subetapas, según se presenta en la Figura 4-2.

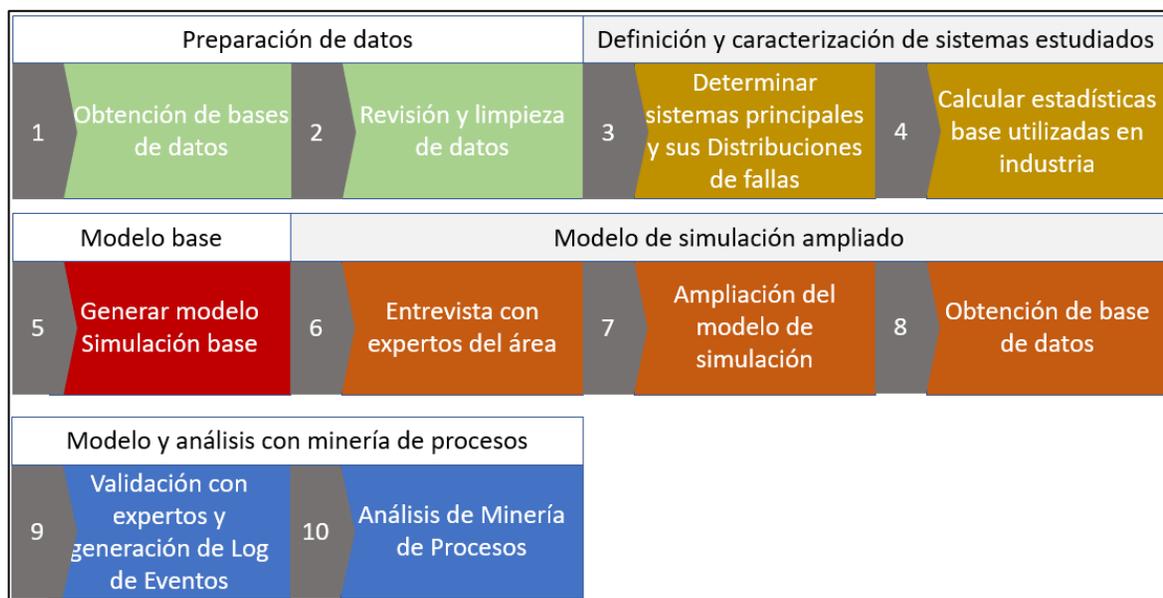


Figura 4-2: Etapas de desarrollo del modelo y análisis. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.1. Etapa 1 - Preparación de datos

##### a) Obtención de Bases de datos

Las bases de datos utilizadas para el presente estudio fueron facilitadas y revisadas en conjunto con expertos del área de mantención de la mina. Estas fueron descargadas desde el sistema SAP y corresponden a los registros de Órdenes y Avisos de producción y mantención de los equipos LHD referentes a los años 2018, 2019 y 2020 (desde enero hasta junio 2020).

La base de datos de Avisos corresponde al registro en SAP de las solicitudes hechas al área de mantenimiento para poder realizar una actividad concreta de mantención y contiene información como: Ubicación técnica de la falla, Denominación de la Ubicación técnica, Código de Aviso, Descripción, Código de Orden correspondiente, Duración de la mantención, Fecha y Hora de inicio de la avería, Fecha y Hora de término de la avería y Clasificación de falla, entre otros. En la Tabla 4.1 se presenta un ejemplo ilustrativo.

Tabla 4.1: Ejemplo base de datos de Avisos.

Ubicación técnica	Denom. Ubicación técnica	Texto	Descripción	Orden	Duración Parada	Inicio avería	Hr. Inicio avería	Fin avería	Hr. Fin avería
THLD-155-SES-BAL	Balde LHD#155	2: correctivo	Reponer pasador balde	102030123	2,00	19.03.2018	13:00:00	19.03.2018	15:00:00
<b>P</b>	<b>Status Usu</b>	<b>Stat. Sist.</b>	<b>Aviso</b>	<b>Autor Aviso</b>	<b>Ce. Coste</b>	<b>A las</b>	<b>El</b>	<b>Creado</b>	<b>GP</b>
X	Nuev	MECE	21324565	PVEL001	HI234	15:20:39	19.03.2018	PVEL001	J20
<b>Modif. el</b>	<b>Por</b>	<b>PtoTrbRes</b>							
20.03.2018	LPerez	MA1HT321							

La base de datos de Órdenes corresponde al registro realizado por parte del equipo de mantención, posterior a la generación del aviso, una vez que se ingresa e inicia la mantención. Esta contiene información como: Ubicación técnica de la falla, Denominación de la Ubicación técnica, Código de Aviso, Descripción, Código de

Orden correspondiente, Duración de la mantención, Fecha y Hora de inicio de la avería, Fecha y Hora de término de la avería, Clasificación de falla y Costo real de la mantención. En la Tabla 4.2 se presenta un ejemplo ilustrativo.

Tabla 4.2: Ejemplo base de datos de Órdenes.

Ubicación técnica	Denom. Ubicación técnica	SumCosReal	CeCo Resp.	Aviso	Orden	Texto breve	Tp.	Cl.
THLD-155-SES-BAL	Balde LHD#155	200,05	HI234	21324565	102030123	LHD reposición pasador balde	30	NP
Inicio avería	Hr. Inicio avería	Fin avería	Hr. Fin avería					
19.03.2018	13:00:00	19.03.2018	15:00:00					

#### b) Limpieza de datos

Una vez definidas las bases de datos a utilizar se revisó la calidad de los datos, para ello, se contrastaron los datos de las bases de Órdenes y Avisos. Se utilizó el código de orden y el código de aviso para comparar los registros de ambas bases de datos, luego se dejó fuera los registros que no presentaban coherencia entre lo descrito en estas tablas, cabe mencionar que estos datos se ingresan de forma manual, lo que en ocasiones genera inconsistencias. Además, se descartaron los registros con información incompleta y sólo se consideró aquellos equipos que estuvieron activos durante todos los años analizados (2018, 2019 y 2020).

Es decir, se mantienen sólo aquellos registros correspondientes a mantenciones no planificadas que presentan información completa, coherente y que permiten trazabilidad de la evolución del equipo en el tiempo. Como resultado del análisis se decidió considerar sólo los datos correspondientes a los años 2018 y 2019 debido a la mayor cantidad y calidad de los datos según los criterios definidos.

#### 4.2.2. Etapa 2 – Definición y Caracterización de sistemas estudiados

a) Determinar sistemas principales y sus distribuciones de fallas

El proceso analizado corresponde al ciclo de producción y mantención de la mina estudiada. El proceso consta de dos ambientes interconectados, el de producción, compuesto por un sistema de túneles en el que los equipos LHD extraen y transportan el mineral, y el de mantención, compuesto por un Taller de Mantención con capacidad de 8 pozos de mantención extensible a 10, y un equipo de 16 mantenedores encargados de 75 equipos, de los cuales 36 son martillos, 15 jumbos radiales, 2 jumbos de reducción secundaria y 22 son equipos LHD's de tipo mecánico de operación manual, distribuidos en 5 modelos diferentes, como se puede ver en la Figura 4-3.

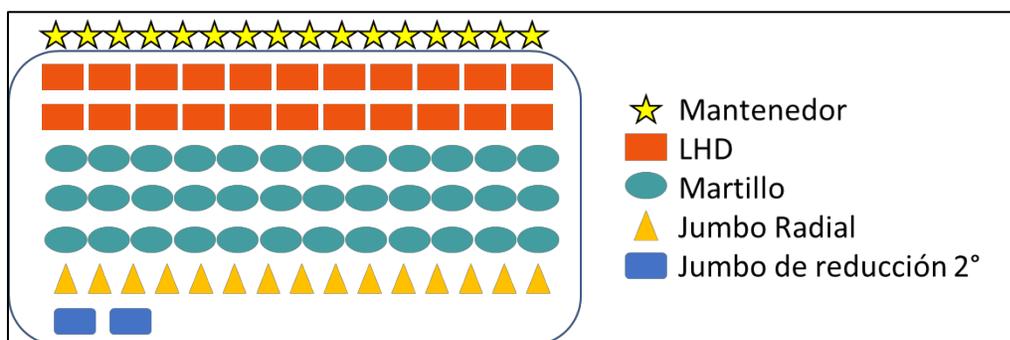


Figura 4-3: Representación de equipo de mantención y parque de equipos. Fuente:

Elaboración propia.

Debido a que los equipos estudiados corresponden a modelos en su totalidad de tipo mecánico operados manualmente, siguen la misma estructura de sistemas, componentes y subcomponentes, lo que se presenta en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Sistemas, componentes y subcomponentes

Sistema	Componente	Subcomponente
<b>Sistema de Aire Acondicionado (SAA)</b>		
<b>Sistema Eléctrico (SEL)</b>	<b>Sistema de control</b>	
	<b>Sistema de Fuerza</b>	
<b>Sistema Estructural (SES)</b>	<b>Balde</b>	
	<b>Bogue</b>	
	<b>Boom</b>	
	<b>Cabina</b>	
	<b>Chasis</b>	
	<b>Eje Oscilante</b>	
<b>Sistema Hidráulico (SHI)</b>	<b>Sistema de Dirección</b>	Cilindro dirección derecho
		Cilindro dirección izquierdo
	<b>Sistema de freno</b>	
	<b>Sistema de levante y volteo</b>	Cilindro de levante derecho
		Cilindro de levante izquierdo
		Cilindro de volteo
<b>Sistema de Lubricación Automático (SLU)</b>		
<b>Sistema Motriz (SMO)</b>	<b>Motor Diesel</b>	
<b>Sistema de Supresión de Fuego (SSF)</b>		
<b>Sistema de Tren de Potencia (STP)</b>	<b>Convertidor Torque - mando Super.</b>	
	<b>Diferenciales</b>	Diferencial delantero
		Diferencial trasero
		Mando final delantero izquierdo
		Mando final delantero derecho
		Mando final trasero izquierdo
		Mando final trasero derecho
	<b>Sistema De Rodado</b>	Neumático delantero derecho
		Neumático delantero izquierdo
		Neumático trasero derecho
		Neumático trasero izquierdo
<b>Transmisión</b>		

Una vez filtrada la base de datos e identificados los sistemas a considerar en el estudio se caracterizó el proceso de operación y reparación mediante el ajuste de las distribuciones de Tiempo entre falla (TEF) y Tiempo para reparar (TPR) a nivel de sistemas. Las distribuciones obtenidas mediante el ajuste en el *software Input Analyzer* se muestran a continuación.

Tabla 4.4: Distribuciones de Sistemas

Sistema	TEF (Hrs.)		TPR (Hrs.)	
	Distribución	Expresión	Distribución	Expresión
SAA	Weibull	WEIB(148; 0,631)	Exponencial	EXPO(3,8)
SEL	Weibull	WEIB(195; 0,807)	Weibull	WEIB(2,96; 0,761)
SES	Weibull	WEIB(189; 0,839)	Weibull	WEIB(3,6; 0,581)
SHI	Weibull	WEIB(140; 0,866)	Exponencial	EXPO(8,77)
SLU	Weibull	WEIB(92,7; 0,388)	Weibull	WEIB(4,32; 0,59)
SMO	Weibull	WEIB(137; 0,753)	Weibull	WEIB(3,27; 0,563)
SSF	Weibull	WEIB(4140; 0,649)	Weibull	WEIB(12,1; 0,786)
STP	Weibull	WEIB(175; 0,772)	Weibull	WEIB(4,44; 0,567)

b) Análisis estratégico, métricas estándar y análisis de fallas

Dado que en la gestión de activos físicos las necesidades son variadas y los recursos limitados, se espera que el equipo de mantención sea capaz de discriminar cuales son los sistemas y componentes críticos a reparar. Para ello, se utilizan métricas estándar en la Gestión de Activos Físicos (Moubray, 2000; Knights, 2005), las que entregan una mirada estratégica del negocio, lo que contempla tanto priorizar entre sistemas, como también definir horizontes de tiempo de mantenciones preventivas, entre otras posibles acciones.

El análisis de fallas permite entender la situación general de las fallas de los equipos y sienta una línea base sobre la cual analizar el ajuste del modelo realizado posteriormente. Los indicadores considerados son: Diagrama de Pareto, Diagrama de Jack Knife, Diagrama de Jack Knife de costo global y Confiabilidad.

Se realiza un diagrama o histograma de Pareto tomando como indicador el tiempo que toma la reparación efectiva de cada sistema según Tiempo fuera de servicio (TFS), lo que nos entrega una noción de priorización según disponibilidad. A continuación, se presentan los diagramas correspondientes al año 2018 y 2019.

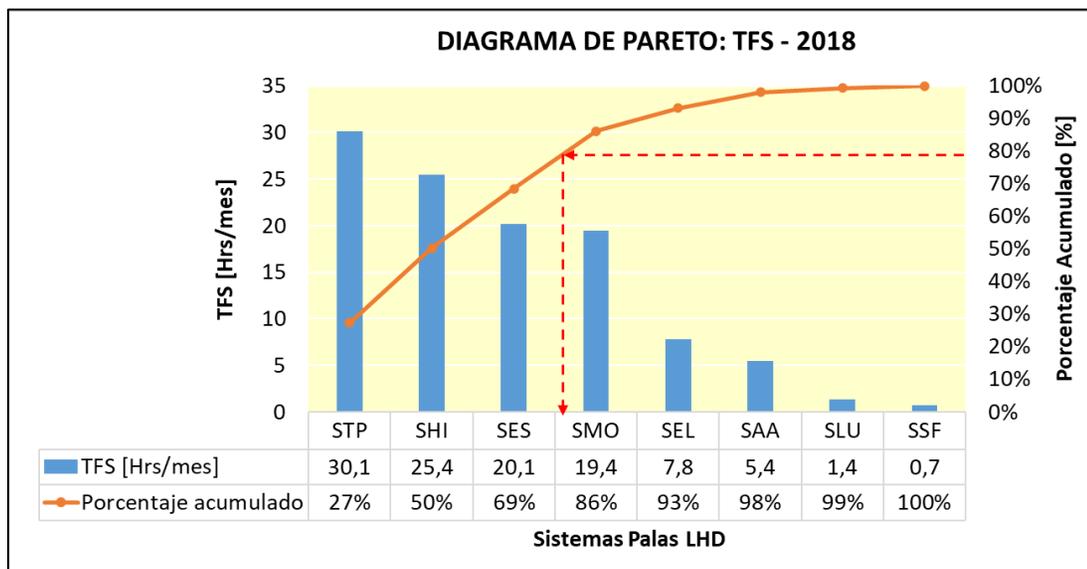


Figura 4-4: Diagrama de Pareto - Tiempo fuera de servicio, 2018. (Elaboración propia).

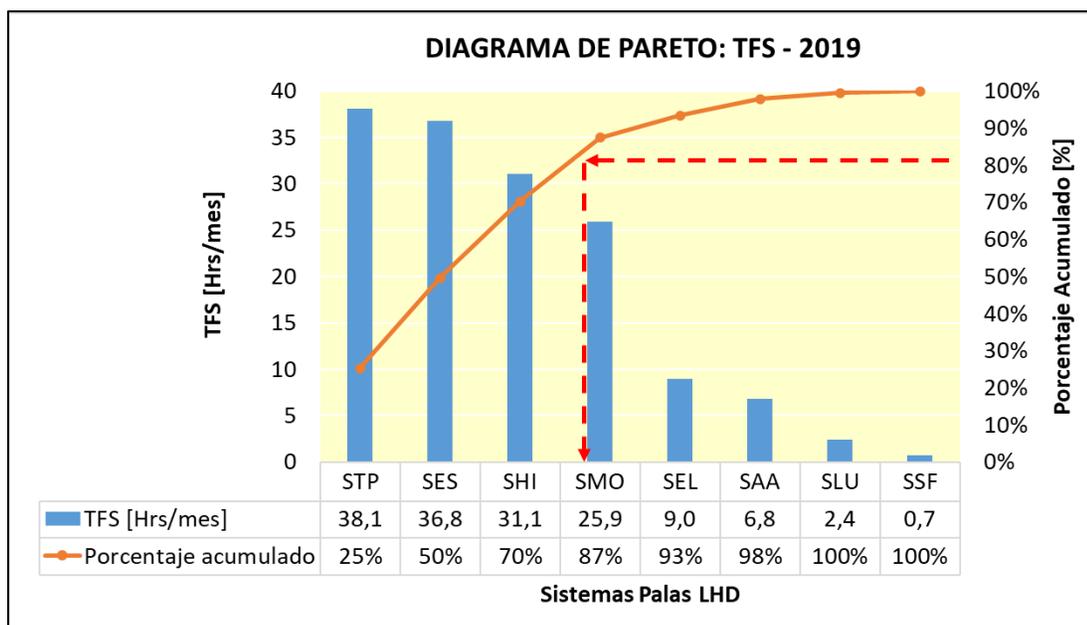


Figura 4-5: Diagrama de Pareto - Tiempo fuera de servicio, 2019. (Elaboración propia).

A partir de las figuras precedentes, se puede notar que no se cumple de manera estricta el postulado de Pareto, según el cual el 80% del efecto se debe al 20% de las causas. En realidad, tanto para el año 2018 como para el 2019 se aprecia una distribución de fallas casi horizontal, donde el 80% del efecto está representado por el 37,5% de las causas y donde la diferencia máxima entre sistemas de falla no es mayor a 11 puntos porcentuales, siendo en promedio de 3,7% para 2018 y 3,6% para 2019.

Además, se aprecia que existe movilidad en el *ranking* entre los primeros tres sistemas, sin embargo, estos se mantienen como los de mayor impacto. Dichos sistemas son el Sistema de Tren de Potencia (STP), el Sistema Estructural (SES) y el Sistema Hidráulico (SHI). Esta movilidad en la prioridad ha sido confirmada por expertos indicando que debido al similar efecto en TFS y las campañas de mantenimiento, es común que la prioridad relativa de estos sistemas varíe en el tiempo, sin dejar de ser los de mayor impacto.

Si bien el análisis previo indica que el foco debe estar en los sistemas mencionados para reducir la indisponibilidad de los equipos, no permite una evaluación detallada acerca de la causa de la indisponibilidad de los sistemas. Para responder a esto se desarrolló un diagrama de Jack Knife el cual permite discriminar entre fallas crónicas, es decir, de alta frecuencia y por tanto baja confiabilidad, y fallas agudas, es decir, aquellas que toman más tiempo para su reparación, también conocidas como fallas de baja mantenibilidad (Knights, 2005). A partir de lo anterior, se definen las fallas de mayor indisponibilidad, ya sean, crónicas, agudas o ambas. A continuación, se presentan los diagramas correspondientes al año 2018, 2019 y un diagrama combinado que evidencia la evolución de los sistemas en el tiempo.

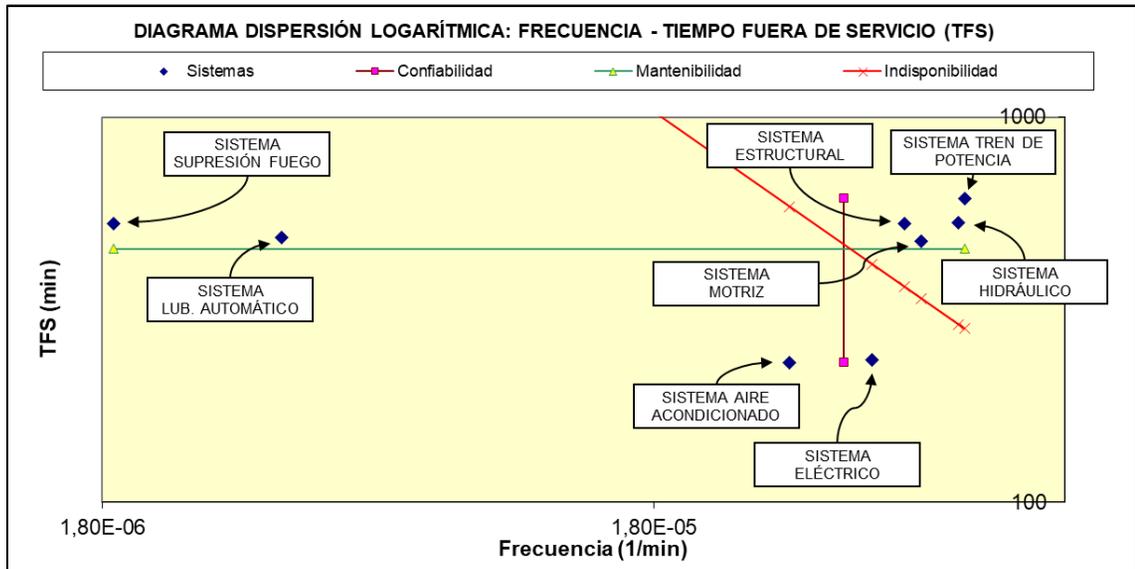


Figura 4-6: Diagrama de Jack Knife fallas 2018. (Elaboración propia).

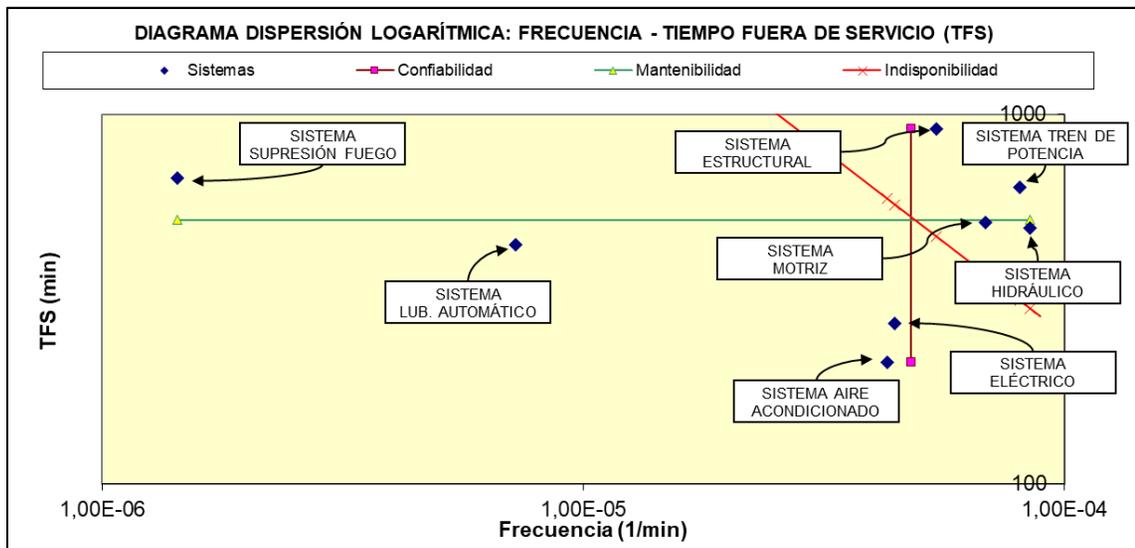


Figura 4-7: Diagrama de Jack Knife fallas 2019. (Elaboración propia).

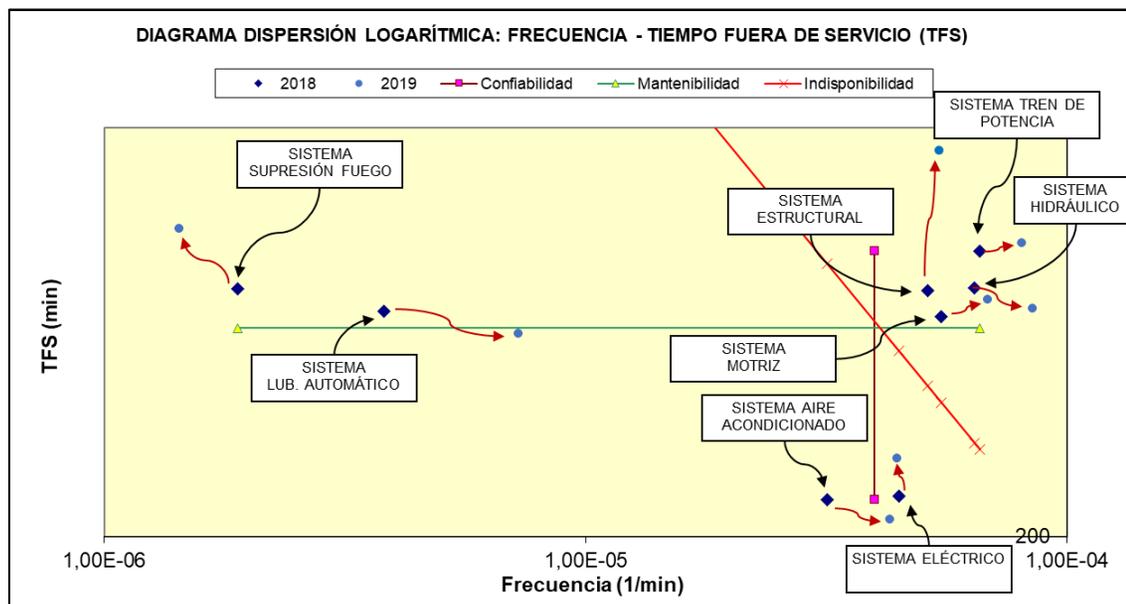


Figura 4-8: Diagrama de Jack Knife. Evolución de desempeño de los sistemas en años estudiados. (Elaboración propia).

En relación a la Figura anterior, se puede concluir que a pesar de las campañas de mantenimiento llevadas a cabo, la indisponibilidad de los equipos aumentó entre el año 2018 y 2019, dado que el total de los sistemas presenta un aumento ya sea en la frecuencia de falla, en el TFS o en ambos. Sin perjuicio de lo anterior, se puede definir que los sistemas críticos por concepto de indisponibilidad (fallas crónicas-agudas) son el Sistema de Tren de Potencia (STP), el Sistema Hidráulico (SHI), el Sistema Estructural (SES) y en cuarto lugar el Sistema Motriz (SMO).

A partir de los anterior, es posible profundizar en el análisis de fallas y analizar la prioridad a nivel de componentes, para el caso de estudio, esto no se considera relevante, no obstante, se presenta el diagrama de Jack Knife para los Componentes del Sistema de Tren de Potencia (STP) en Anexos A y B, siendo la Transmisión el componente más crítico.

Las fallas crónicas son aquellas que más contribuyen al número de fallas observadas. En el caso de los equipos considerados, si analizamos la Figura 4-6, el Sistema Hidráulico y el Sistema de Tren de Potencia corresponden a los que más afectan la

confiabilidad. Por tanto, el solucionar la causa raíz de estas fallas implicará el mayor aumento del TMEF.

Las fallas agudas, es decir aquellas que conllevan un mayor tiempo de reparación están dadas principalmente por el Sistema Estructural y el Sistema de Tren de Potencia. Al mejorar los tiempos de identificación de la causa de la falla y el proceso de mantenimiento se podrá reducir su TMPR. En la Figura 4-6, se puede observar que el Sistema de Supresión de Fuego se presenta como un caso agudo relevante, sin embargo, debido a su baja frecuencia el impacto de enfocarse en resolver esta falla no contribuirá mayormente en mejorar la disponibilidad de la flota.

A pesar de lo anterior, como regla general se cumple que el costo de reparación de las fallas agudas es superior a aquellas consideradas leves, debido a que requieren repuestos más caros, mayor tiempo ocioso del equipo y mayor dedicación por parte del personal, razón por la cual siempre deben ser observadas.

A su vez, se puede identificar el Sistema Eléctrico (SEL) como uno de falla crónica, si bien mantiene un peso menor en la indisponibilidad total a las ya mencionadas, situación similar ocurre con el Sistema de Supresión de Fuego (SSF), el cual se detecta como un sistema de falla aguda pero de baja ocurrencia. Finalmente, el Sistema de Lubricación Automática (SLU) y el Sistema de Aire Acondicionado (SAA) corresponden a sistemas de baja prioridad para el equipo de mantenimiento.

Como menciona Knights, P. (2005), las fallas crónicas de bajo impacto por lo general resultan fáciles de identificar para los mantenedores y no representan un peligro inminente para la seguridad, mientras que las fallas ocultas y potencialmente peligrosas (críticas) deberían ser abordadas mediante la implementación de RCM según se describe en Moubray (2000).

Una vez definidas las causas raíz, la priorización debería ser determinada directamente en función de la indisponibilidad y el costo global de reparación asociado. Es importante notar que el costo asociado a la mantención de una falla no está dado únicamente por el costo del repuesto, sino también al costo de oportunidad de la pérdida productiva, el costo de la mano de obra asociada, el costo de la redundancia al considerar equipos adicionales para reducir el impacto en la

producción y el costo de mantener un mayor y más variado *stock* de repuestos en bodega.

En este estudio, el costo de oportunidad sobrepasa considerablemente a la suma de los costos antes mencionados, a modo de ejemplo, el costo directo de mantención del caso estudiado, según cálculos realizados, en promedio representa el 0,6% del costo de oportunidad de reparar el equipo y un 4% del costo global de mantención.

En este caso la industria está sujeta al comportamiento cíclico del precio del cobre en función del cual la estrategia de mantención es modificada para maximizar la ganancia y aprovechar el costo de oportunidad. De este modo, en teoría, durante un ciclo de precio alto el costo de oportunidad de la mantención aumenta por lo que se privilegia la producción a costa de la disponibilidad, confiabilidad de los equipos y mayor costo de reparación, es decir, se prefiere reparar las fallas crónicas y agudas de alta indisponibilidad para que los equipos vuelvan rápidamente a producción (Knights, 2005).

Por otro lado, durante ciclos de bajo precio, el costo de mantención asume mayor relevancia debido a la reducción del costo de oportunidad, por lo que se busca reducir y controlar los costos de mantención lo que da mayor énfasis en KPI's como la confiabilidad y disponibilidad de los equipos, es decir, se prefiere reparar las fallas agudas y crónicas de alta indisponibilidad.

El presente estudio, se desarrolló durante un ciclo de bajos precios por lo que se sugiere dar prioridad dentro de la estrategia de mantención al STP, SHI, SES, SMO y según presupuesto se podría considerar el SSF por sobre el SAA y el SEL.

El análisis anterior puede ser complementado por un diagrama de Jack Knife en función de los costos globales (Anexos C y D).

Finalmente, se puede profundizar en el análisis considerando cómo evoluciona la confiabilidad de cada sistema a medida que aumenta la vida útil del activo. En este punto se evidencian dos tendencias, una mayoritaria, en la cual los sistemas reducen rápidamente su confiabilidad llegando a estar bajo el 60% a las 100 hrs operativas y otra minoritaria dada por el SSF que no baja del 80% incluso pasadas las 380 hrs, como se evidencia en la Figura 4-9.

Lo anterior, se explica porque el SSF corresponde a un sistema de seguridad y como tal posee un alto estándar de confiabilidad. Este dato sugiere una modificación o especificación en la recomendación que se desprende de Jack Knife, dado que, si bien representa una falla aguda, debido a la alta confiabilidad del sistema este permite que las mantenciones preventivas puedan ser espaciadas en el tiempo, dando espacio a la mantención de fallas más críticas.

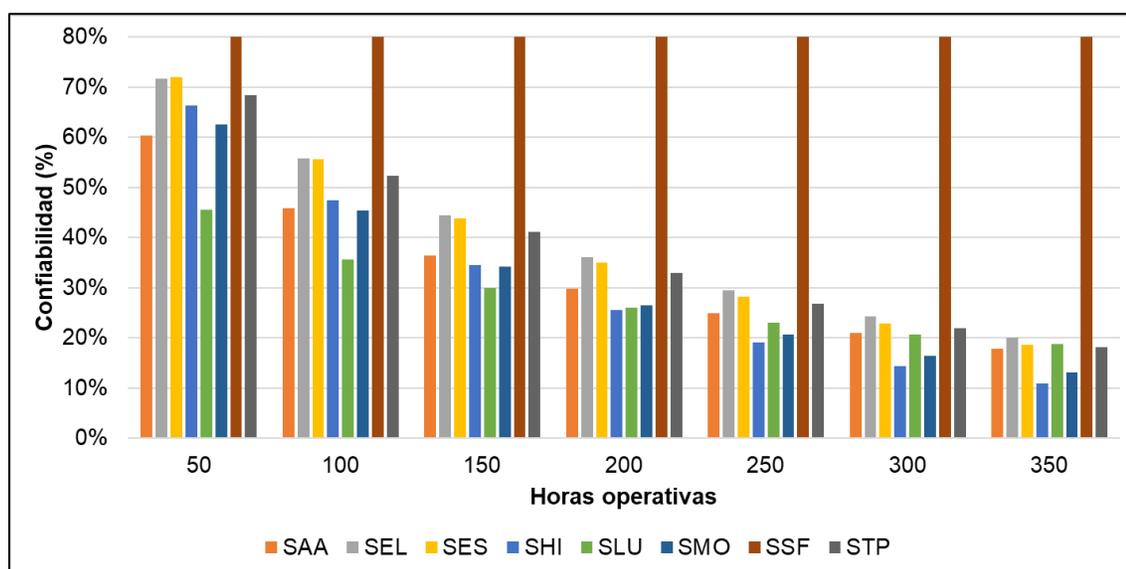


Figura 4-9: Gráfico de confiabilidad de sistemas. (Elaboración propia).

Actualmente, el plan de mantenimiento de la mina considera una mantención preventiva a las 100 hrs de operación de los equipos LHD, lo que busca mejorar la confiabilidad de la flota y reducir el impacto de las fallas. Debido a que según registros históricos una falla producida pasado el 60% de confiabilidad tiende a ser de tipo agudo, a partir del gráfico resulta tentador sugerir implementar una mantención preventiva a las 50 hrs para no bajar del 60%, sin embargo, esto debe ser contrastado con la factibilidad operacional y económica de retirar cada equipo de la operación con tal frecuencia, decisión que requiere un estudio más profundo del caso.

### 4.2.3. Etapa 3 – Modelo de Simulación Base

El análisis anterior, acompañado de la implementación de una política de mantenimiento tipo RCM resulta muy efectivo en términos de priorizar y determinar en qué enfocar los esfuerzos de mantenimiento y delinear una estrategia de gestión de activos físicos, sin embargo, no da respuesta al cómo se lleva a cabo el proceso de mantenimiento de los sistemas caracterizados.

De este modo, aun sabiendo qué se debe reparar y cada cuánto se debe reparar, si el proceso de mantenimiento, en general, o la mantención misma, en particular, no se desarrolla de la manera adecuada se puede incurrir en costos por ineficiencias del proceso, lo que se conoce como grasas operacionales en *Lean Management* y se derivan mayormente del ya mencionado costo de oportunidad.

Por ello, se hace necesaria la evaluación de este proceso, tarea poco frecuente y que en ocasiones se realiza con herramientas como la simulación de eventos discretos. Sin embargo, esto supone la caracterización a partir de la generación de escenarios que replican y modifican el sistema real, y no supone un análisis directo de lo que realmente está ocurriendo desde el punto de vista del proceso.

Este estudio busca validar a nivel teórico los beneficios de implementar minería de procesos para analizar el proceso desde los datos reales, lo que permite identificar reprocesos, fallas en el mismo, cuellos de botella y oportunidades de mejora.

Dicho esto, para la correcta implementación de minería de procesos se requiere datos confiables y en cantidad suficiente de las diferentes actividades desarrolladas durante el proceso de mantención. Actualmente estos datos no se registran en la base

de datos, razón por la cual se propone el uso de simulación para generar los datos requeridos y así dar paso al análisis con minería de procesos.

Si a futuro se desea implementar el uso de minería de procesos como un estándar, se recomienda habilitar un sistema de registro de datos tal que permita utilizar los datos de forma directa y en tiempo real.

De este modo, se buscó reproducir el comportamiento del tiempo entre fallas y el tiempo efectivo para reparar a nivel de sistemas, lo cual se ejecuta a partir de las distribuciones de tiempo entre falla y de tiempo efectivo de reparación definidas en “Tabla 4.4: Distribuciones de Sistemas”

El sistema simulado está compuesto principalmente por las entidades (22 equipos LHD), los atributos, módulos de decisión condicional y los módulos *read/write*, utilizados para registrar la duración de cada actividad. Los atributos del sistema corresponden a la distribución de los tiempos entre falla y al tiempo para reparar (en Tabla 4.4) y a la distribución de los tiempos de cada actividad del proceso de mantención.

A partir de los datos resultantes del modelo base, se generó un diagrama de Pareto (Figura 4-10) para su contrastación con los generados a partir de la data real. Según esto, se puede evidenciar que se mantiene la tendencia horizontal en el peso porcentual de los sistemas, de igual modo se mantienen dos grupos de criticidad, los componentes más críticos son el SHI, STP, SMO y SES, mientras que los menos críticos son SLU, SAA, SEL y SSF.

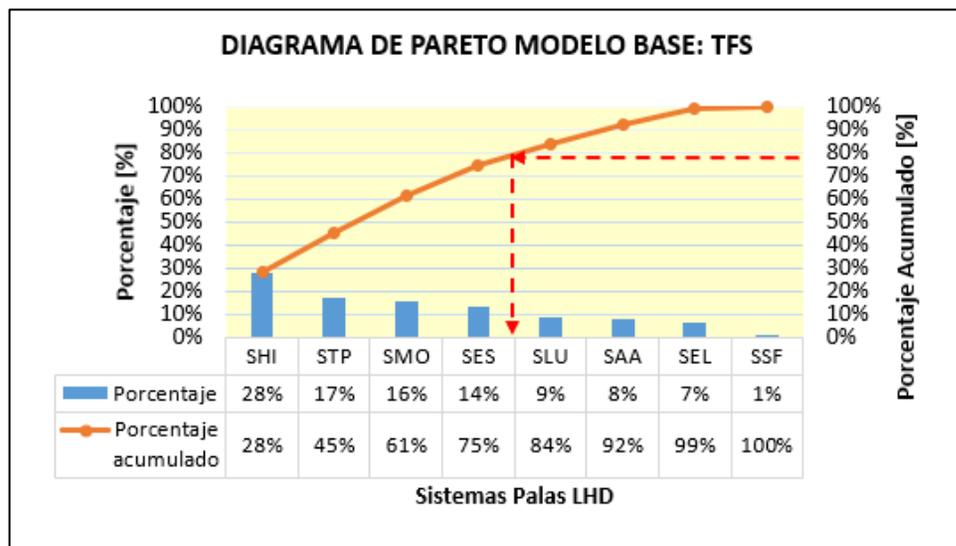


Figura 4-10: Diagrama de Pareto - Tiempo fuera de servicio – Modelo base, 2019.

(Elaboración propia).

Se puede notar que el orden de importancia de los sistemas dentro de cada uno de estos grupos presenta diferencias. Al revisar esto en conjunto con expertos del área de mantenimiento, se determinó que si bien existen diferencias porcentuales, desde un punto de vista operativo estas son atribuibles al comportamiento homogéneo y de similar impacto de las fallas, lo que está dentro de lo esperado dado que es normal que la criticidad varíe dentro de estos grupos como consecuencia de las campañas de mantenimiento focalizadas que se llevan a cabo de forma periódica, tal como se vio en el análisis base de las fallas de los años 2018 y 2019.

Desde el punto de vista técnico, esto también se puede explicar por el uso de distribuciones ajustadas para analizar el proceso y no de datos reales, como podría ser en el caso de tener un sistema de medición desarrollado para el análisis de minería de procesos. En este punto, es importante mencionar que incluso con la

implementación de un *software* como *Input Analyzer* para identificar el mejor ajuste a los datos, este no podrá replicar de forma exacta los datos reales.

Al respecto, se definió que este resultado no tiene mayor impacto para el ejercicio en desarrollo, cuyo objetivo es evaluar a nivel teórico la aplicación de minería de procesos en el ciclo de mantención de equipos. Por lo tanto, se consideró suficiente para validar el modelo y ampliarlo para obtener la base de datos y posteriormente generar el *log* de eventos.

#### **4.2.4. Etapa 4 – Modelo de Simulación Ampliado**

##### a) Entrevista con expertos del área

Debido a la escasez de datos en cantidad y calidad y al bajo nivel de abstracción de los disponibles, no se cuenta con una base apropiada para generar un log de eventos de forma directa. Para llevar a cabo el análisis con minería de procesos se ve la oportunidad de utilizar un modelo de simulación que combina distribuciones de datos de la flota de equipos LHD, con distribuciones ajustadas según el juicio experto de mantenedores a cargo de los talleres de la mina.

Para definir la distribución de la duración de cada actividad del proceso, se entrevistó a una mesa de expertos de la mina, según lo que se definieron tiempos que pueden ser catalogados como constantes y algunos representados por distribuciones triangulares. El detalle de estas actividades se presenta a continuación en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Distribución de Tiempo de actividades del proceso de mantención.

Atributo	Detalle	Distribución de tiempo (segundos)
T Ev Op terreno	Tiempo de evaluación del operador en terreno	600
T mant busca rep (1,2)	Tiempo que demora el mantenedor en buscar el repuesto	TRIA(300,600,900)
T espera herr (1,2,3)	Tiempo de espera de herramientas cuando están ocupadas	TRIA(750,900,950)
T espera camioneta (1,2)	Tiempo en que el mantenedor espera que se desocupe una camioneta para poder ir a atender la falla	TRIA(1.800,2.700,3.600)
T tomar camioneta (1,2,3)	Tiempo que demora el mantenedor en recibir, revisar y subirse a la camioneta	300
T ir al equipo (1,2,3)	Tiempo de viaje desde el taller al equipo	TRIA(1.800,1.800,7.200)
T ev en terreno (1,2)	Tiempo de evaluación del mantenedor en terreno	600
T vuelve a taller a bus rep	Tiempo que toma al mantenedor devolverse al taller a buscar el repuesto	TRIA(1.800,1.800,7.200)
T falla mayor	Tiempo que toma transportar el equipo con escolta y remolque al taller producto de una falla mayor	TRIA(9.000,12.600,57.600)
T falla menor	Tiempo que toma al equipo desplazarse al taller con una falla menor	TRIA(1.800,1.800,7.200)
T llega equipo a taller	Tiempo que demora un equipo en llegar al taller cuando el operador decide ir directamente	TRIA(1.800,1.800,7.200)
T ev en taller	Tiempo que demora un equipo en ser evaluado en el taller	600
T fila lavado	Tiempo de cola de un equipo para ingresar a lavado	TRIA(3.600,5.400,10.800)
T desarme	Tiempo que demora un equipo en ser desarmado para retirar una pieza que se requiere con urgencia en otro equipo	TRIA(3.600,7.200,10.800)
T espera repuestos	Tiempo de espera de repuestos en taller	TRIA(600,1.200,1.800)
T atiende emergencia	Tiempo que demora el mantenedor en atender una emergencia antes de volver al equipo	TRIA(1.800,14.400,28.800)
T espera retiro	Tiempo que el equipo espera ser retirado una vez sale de mantención	TRIA(1.200,4.800,6.000)
T equipo vuelve a operaciones	Tiempo que el equipo demora en volver a operaciones desde que es retirado	600
T lavado	Tiempo de lavado del equipo	TRIA(1.800,2.700,10.800)

Debido a los diferentes escenarios posibles se utilizaron atributos equivalentes, por ejemplo, “T ir al equipo 1”, “T ir al equipo 2” y “T ir al equipo 3” se resumen como “T ir al equipo (1,2,3)”. Esto indica que es la misma actividad con igual distribución de tiempo, pero en una ramificación diferente del modelo.

b) Ampliación del modelo

A continuación, en la Figura 4-11, se presenta un esquema del modelo ampliado.

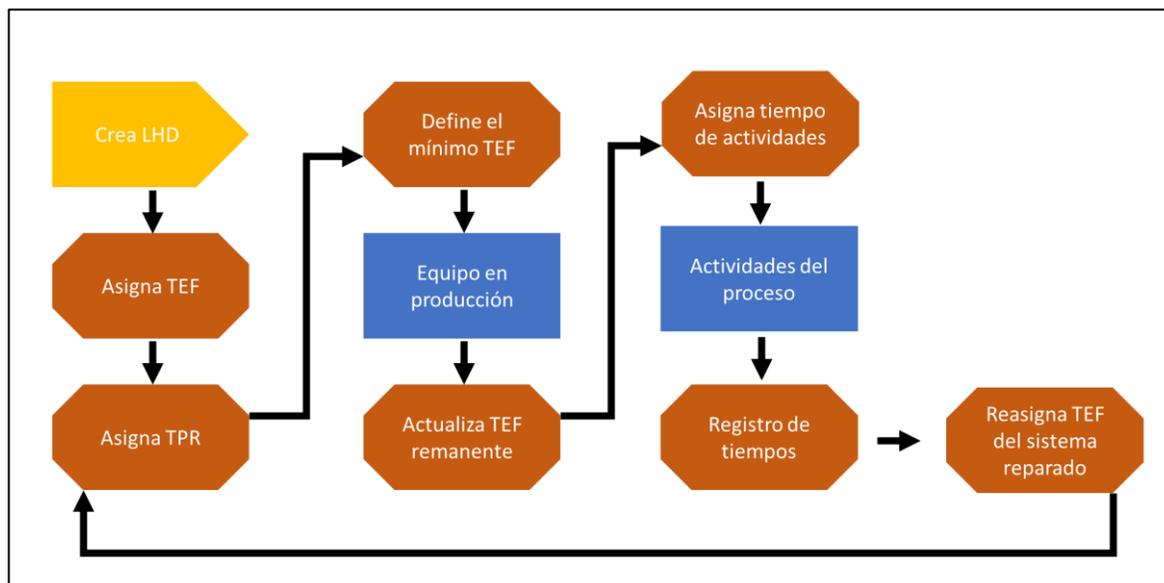


Figura 4-11: Esquema del modelo simulado del proceso de mantenimiento de equipos

LHD. Fuente: (Elaboración propia).

En la Figura 4-11 se observa el módulo que genera las entidades (LHD's) a las que se les asignan los atributos TPR y TEF. Luego, se define el mínimo TEF para determinar cuál será el siguiente sistema en fallar. Este tiempo, corresponde al tiempo de producción del equipo antes de la siguiente falla.

El tiempo de producción termina cuando uno de los sistemas falla, en este punto, el modelo asigna los tiempos de cada tarea y se inician los árboles de decisión que representan las diferentes variantes de proceso que se pueden generar, estas están definidas como "rutas", una vez que el proceso toma una ruta, redefine todos los atributos correspondientes a las rutas no consideradas como cero. Según la ruta que tome el proceso este considerará desarrollar la mantención en terreno o en el taller. Luego de las actividades de preparación para la mantención, se lleva a cabo la actividad de reparación. Terminado esto, todo lo realizado se registra mediante el

módulo *read/write* y se reinicia el tiempo de falla del sistema reparado para luego reiniciar el proceso.

c) Obtención de base de datos

El modelo permite que mediante el módulo *read/write* se registren las actividades realizadas y los tiempos simulados, lo que se exportó en una planilla Excel como la que se presenta en la Figura 4-12.

Number ID	Equipo	Sistem	TNOW	TBF	T ev Op en terreno	T mant busc rep
7	LHD-1	6	536247	26430	600	565656956
12	LHD-1	8	994291	39333	600	530
15	LHD-1	1	1464157	189224	600	565656956
23	LHD-1	2	2244755	17705	600	565656956
32	LHD-1	2	3842587	114831	600	608
55	LHD-1	6	7780448	39041	600	518

Figura 4-12: Ejemplo de datos obtenidos del modelo ampliado. Fuente: (Elaboración propia).

En esta planilla, se presenta un número ID que permite identificar el proceso, luego se define el equipo afectado por la falla, el código del sistema afectado, el tiempo total del proceso (TNOW), el tiempo entre fallas (TEF – TBF) y el tiempo de duración de cada actividad desarrollada en orden cronológico de izquierda a derecha. En los casos en que una actividad no se desarrolló aparece el código “565656956” definido por *default*.

#### 4.2.5. Etapa 5 – Modelo y análisis con minería de procesos

a) Generación de log de eventos

El log de eventos de un modelo de minería de procesos constituye una parte fundamental del análisis, ya que si este no está limpio (sin inconsistencias) y ordenado se compromete la calidad del posterior análisis.

A modo general, un *log* de eventos sigue una estructura similar a la que se ve en la Figura 4-13 y se constituye de un código que identifica el caso, comúnmente

llamado “*Number ID*”, las actividades realizadas y el “*TimeStamp*” o marca de tiempo de la actividad, la que comúnmente define la fecha y hora de inicio de la actividad, sin perjuicio de que se pueda añadir uno que delimite el fin.

NUMBER ID	EQUIPO	SISTEMA	ACTIVIDAD	DURACIÓN	FECHA INICIO	FECHA TÉRMINO
1	LHD-1	SLU	TEF	2129	01-01-2020 00:00:00	01-01-2020 00:35:29
1	LHD-1	SLU	Evaluación de Operador en Terreno	600	01-01-2020 00:35:29	01-01-2020 00:45:29
1	LHD-1	SLU	Espera Camioneta	3145	01-01-2020 00:45:29	01-01-2020 01:37:54
1	LHD-1	SLU	Tomar Camioneta	300	01-01-2020 01:37:54	01-01-2020 01:42:54
1	LHD-1	SLU	Ir al Equipo	5394	01-01-2020 01:42:54	01-01-2020 03:12:48
1	LHD-1	SLU	Evaluación en terreno	600	01-01-2020 03:12:48	01-01-2020 03:22:48
1	LHD-1	SLU	Equipo va a taller (escolta/remolque)	16988	01-01-2020 03:22:48	01-01-2020 08:05:56
1	LHD-1	SLU	Lavado de Equipo	3919	01-01-2020 08:05:56	01-01-2020 09:11:15
1	LHD-1	SLU	Atiende Emergencia	9238	01-01-2020 09:11:15	01-01-2020 11:45:13
1	LHD-1	SLU	TPR	105986	01-01-2020 11:45:13	02-01-2020 17:11:39
1	LHD-1	SLU	Equipo Espera Retiro	5083	02-01-2020 17:11:39	02-01-2020 18:36:22
1	LHD-1	SLU	Equipo Vuelve a Operar	600	02-01-2020 18:36:22	02-01-2020 18:46:22

Figura 4-13: Estructura del log de eventos utilizado. Fuente: (Elaboración propia).

Adicionalmente, se pueden incorporar columnas con categorías conocidas como recursos, que en el caso de estudio están dadas por “Equipo”, “Sistema” y “Duración”, las que tienen como fin enriquecer el análisis generado. En una eventual implementación en un piloto de prueba, se podrían incorporar recursos según el objetivo del análisis, por ejemplo, los recursos “Mantenedor”, “Operador”, “Turno” y “Grupo”.

Los datos obtenidos del modelo ampliado fueron reordenados para poder disponer de ellos en la forma de un *log* de eventos y así permitir el análisis de minería de procesos. Un extracto del *log* se presenta en la Figura 4-13.

#### b) Procesamiento con minería de procesos

Una vez definido el log de eventos, este se cargó al *software* DISCO para obtener la visualización de las variantes de proceso desarrolladas durante el ciclo de mantención, como se muestra en la Figura 4-14.

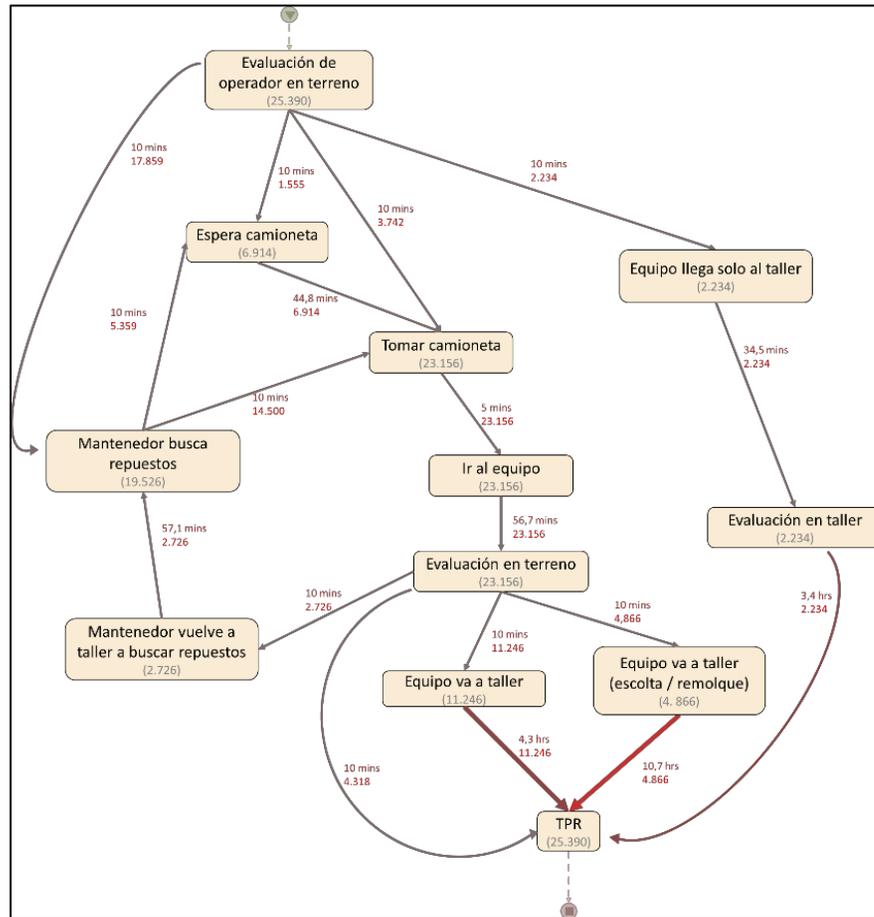


Figura 4-14: Visualización base de minería de procesos con principales variantes.

Fuente: (Elaboración propia).

Posteriormente, se utilizó filtros de tipo *workflow* (filtros de flujo de trabajo) para realizar los diferentes análisis deseados y dar respuesta a algunas de las diferentes interrogantes planteadas.

## 5. ANÁLISIS DEL MODELO

### 5.1. Consideraciones del análisis

El análisis desarrollado considera las ideas expuestas a lo largo del estudio, tales como:

- El costo de oportunidad de no procesar material debe ser considerado al analizar el proceso.
- El escenario de precios puede condicionar la estrategia de mantenimiento a seguir, sin embargo, la ejecución de esta puede ser mejorada independiente de la estrategia seleccionada.
- El *log* de eventos considerado ha sido generado a partir de un modelo de simulación que considera las distribuciones ajustadas del tiempo entre fallas y el tiempo para reparar por sistema.
- Dicho modelo incorpora distribuciones para la duración de cada actividad, las cuales fueron ajustadas a partir del juicio de un grupo de expertos.
- El resultado de este análisis no busca la implementación directa de la minería de procesos como un estándar por parte de la mina, dado que se trata de un ejercicio teórico. Por el contrario, resultados positivos de este estudio, sugieren la existencia de una oportunidad de mejora, lo que puede ser evaluado en un contexto operacional mediante una prueba piloto para validar el aporte de valor de la minería de procesos y avalar su posterior implementación como un estándar operacional.

### 5.2. Posibles focos de estudio

En particular respecto al caso de estudio considerado, existen diversas preguntas que se pueden hacer al proceso de mantención de equipos LHD desde distintos puntos de vista, por ejemplo, el jefe de confiabilidad podría estar interesado en definir qué sistemas son los que presentan más fallas o cuáles son las más complejas o agudas;

el mantenedor podría preguntarse cuál es el procedimiento formal de mantención, cómo saber si debería reparar en terreno o en taller, cuánto debería demorarse por mantención o si acaso su desempeño está dentro de lo normal; la jefatura de mantención podría interesarse por conocer qué mantenedor tiene los menores tiempos para reparar un equipo y qué hace diferente, qué elementos del proceso mejorar para que los mantenedores mejoren sus tiempos de respuestas, quizás saber si los sistemas habilitantes, como el número de camionetas, pozos de lavado o pozos de reparación instalados afectan al proceso y en qué medida o cuáles son las trazas o flujos del proceso más frecuentes y cómo esto podría impactar en el uso de los recursos.

Del mismo modo, aquellos que interactúan con el área de mantención podrían hacerse preguntas, como, por ejemplo, el operador que quiere conocer cómo su participación en el ciclo de mantención afecta al negocio minero, ¿debería pedir asistencia en terreno al equipo o debería llevarlo hasta el taller?, ¿cómo podría mejorar para contribuir a un mejor desempeño global?, etc. Así, el ejercicio se puede extender a planificadores, abastecimiento, encargados de diseño mina, recursos humanos, servicios, logística y transporte entre otros. Algunas de estas interrogantes serán abordadas a continuación.

### **5.3. Análisis general**

El *log* de eventos generados cuenta con 25.644 casos, es decir, se analiza el proceso de mantención de 25.644 fallas ocurridas a 22 equipos LHD, en un horizonte de estudio (simulado) de 5 años. Entre los casos se pueden encontrar más de 30

variaciones del proceso seguido desde que un equipo falla hasta que vuelve a operaciones. Lo anterior, da nociones del bajo nivel de estandarización y/o del dinamismo del proceso y de la existencia de múltiples decisiones posibles.

Sobre esto último, se identifican 2 tomadores de decisiones claves, el operador y el mantenedor, cuyas decisiones modifican el proceso analizado, sin perjuicio del rol fundamental que desempeñan los planificadores de mantenimiento, analistas y personal de abastecimiento.

Al representar el flujo de proceso en el *software* DISCO, es posible evidenciar dos ambientes de mantenimiento, en taller y en terreno. A su vez, se puede notar que todas las mantenciones realizadas en taller deben pasar primero por la actividad “Lavado”, lo que genera un cuello de botella representado por la actividad “Espera lavado”, como se presenta de forma referencial en la Figura 5-1. Esto será analizado en detalle más adelante.

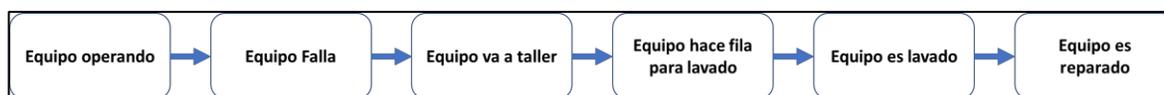


Figura 5-1: Esquema referencial de proceso con actividad de lavado. Fuente:

Elaboración propia.

Por otro lado, se reconoce el rol del operador como primer diagnóstico, lo que se refleja en dos decisiones clave, la primera dice relación con llevar el equipo al taller o solicitar al mantenedor que revise el equipo en terreno, la segunda, con generar el

primer diagnóstico e indicar al mantenedor la causa de la falla u omitirlo. Un análisis más acabado del proceso se presenta a continuación.

#### **5.4. Análisis de comportamiento generado versus comportamiento esperado**

A partir del modelo presente en la Figura 4-1, construido en base a juicio experto, se ve que existe un proceso con 5 flujos posibles, de los cuales 3 consideran que la reparación se realice en el taller. Sin embargo, al realizar un análisis de Conformidad se detectan actividades adicionales a lo que se menciona como parte del proceso, por parte de los expertos, así como también reprocesos que pueden ser considerados grasas o ineficiencias. Estas actividades son:

Tabla 5.1: Actividades adicionales encontradas y grasas del proceso

<b>Actividades adicionales</b>	<b>Grasas (errores del proceso)</b>
Mantenedor busca repuestos	Mantenedor sale a atender emergencia
Mantenedor toma camioneta	Equipo espera retiro
Mantenedor se traslada al equipo	Fila para lavado
	Mantenedor espera camioneta
	Desarme de equipo para armar otro
	Mantenedor vuelve al taller a buscar repuesto
	Espera de repuestos
	Mantenedor espera herramientas

El impacto de estas grasas del proceso se puede medir en términos del tiempo añadido al ciclo de mantención, lo cual conlleva un costo de oportunidad definido por valor del mineral que el equipo deja de extraer por estar fuera de servicio (Indisponible).

## **5.5. Análisis de principales desviaciones del proceso**

A partir del análisis de los datos se puede establecer 5 etapas claves del proceso:

- Diagnóstico/evaluación Inicial
- Tiempo de Reacción
- Priorización de fallas
- Proceso de preparación
- Mantenimiento efectiva y regreso a operación

### **5.5.1. Diagnóstico/Evaluación Inicial**

Para analizar la etapa “Diagnóstico/Evaluación Inicial” en primer lugar se aplica el filtro de proceso, ocultando todos los casos en que se realice la actividad “Lavado” para obtener los casos reparados en terreno (Figura 5-2), lo que corresponde a 7.059 casos (27,5%) de los 25.644 totales, desarrollados en la simulación de 5 años. Este valor es similar al 30% definido por el equipo de expertos como regla general.

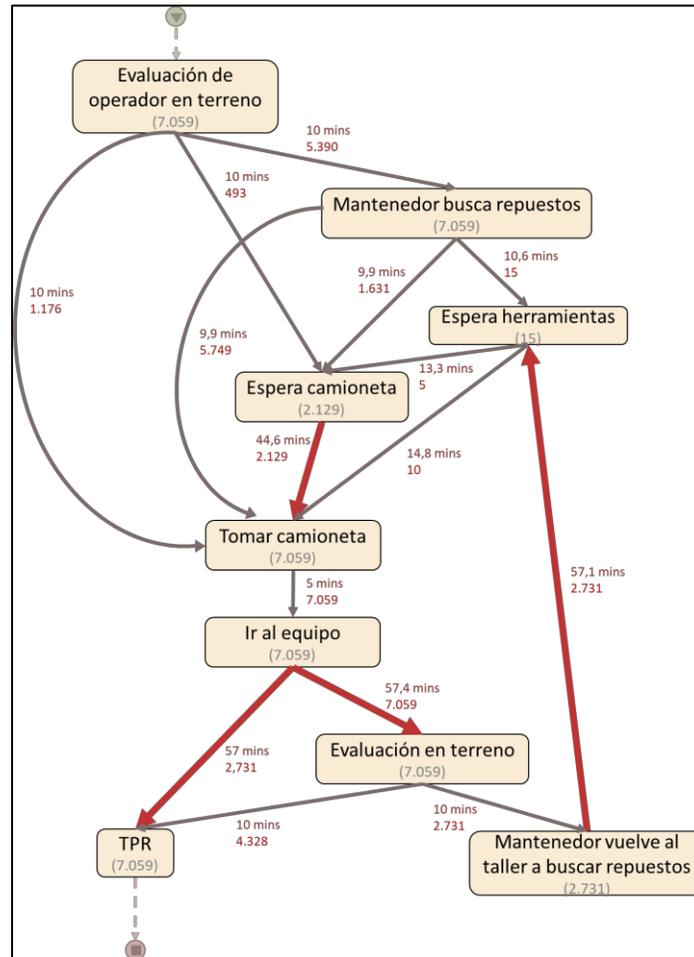


Figura 5-2: Flujo de proceso - Casos reparados en terreno. Fuente: (Elaboración propia).

Posteriormente, se exigió al modelo que muestre sólo los casos que incluyen la actividad “Lavado” para obtener los reparados en taller (Figura 5-3) obteniendo el complemento del filtro anterior, es decir, 18.585 casos (72,5%). Un aspecto para considerar es la mayor complejidad de estas variantes, dado que involucran más actividades y por tanto mayor variabilidad en el proceso mismo. A diferencia de las fallas reparadas en terreno, estas toman más tiempo y presentan un TMPR 8,2 hrs.

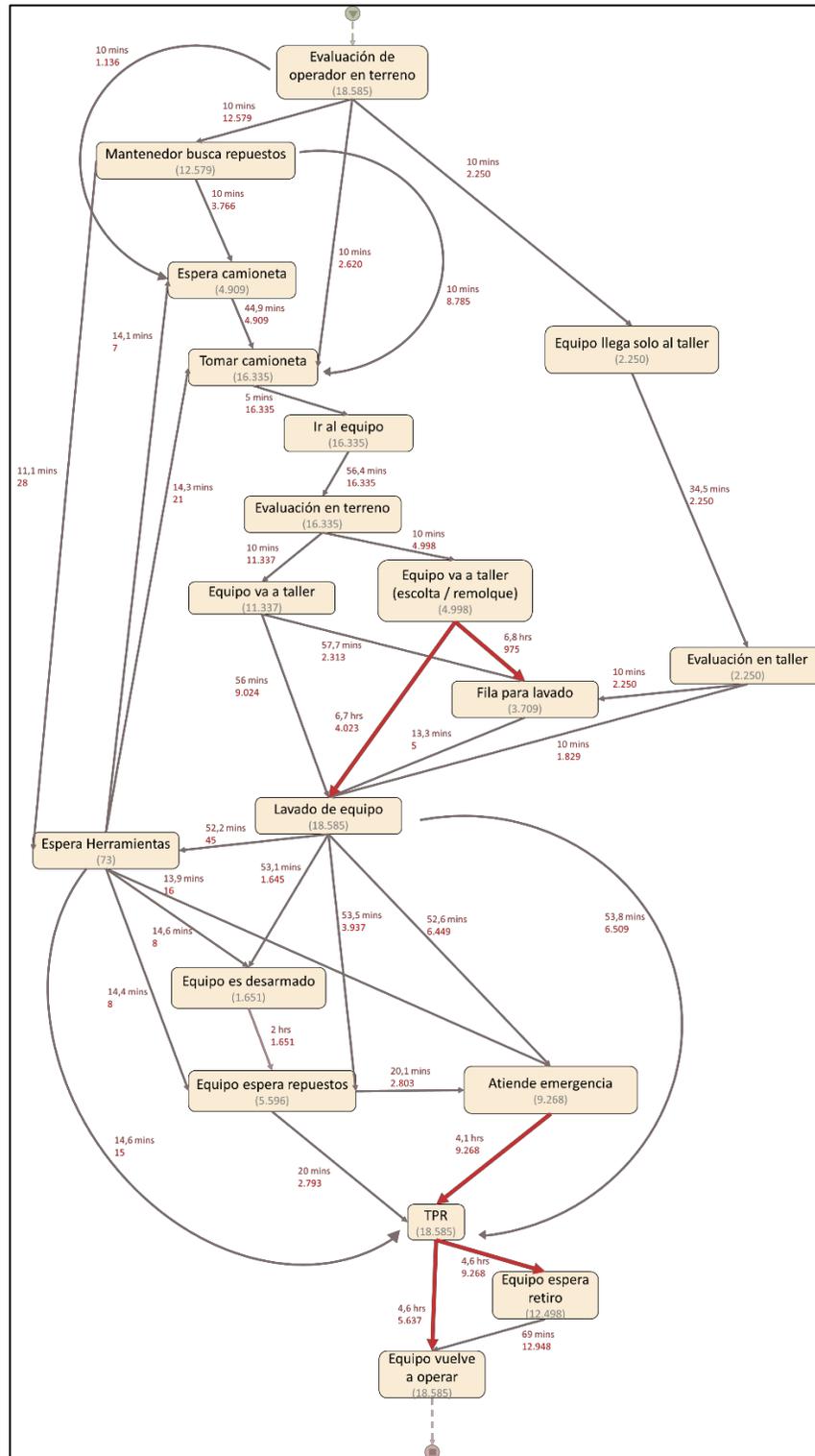


Figura 5-3: Flujo de proceso - Casos reparados en taller. Fuente: (Elaboración propia).

A partir de lo anterior, se evidencia que las fallas reparadas en terreno son menos agudas (se reparan más rápido) si bien son menos frecuentes, como se presenta en la Tabla 5.2. Si esto es bien aprovechado representa una oportunidad para aumentar el rendimiento del equipo mantenedor, es decir, si se eliminan las grasas operacionales de estos procesos, se podrá liberar a operación equipos de forma más rápida y así tener más gente disponible para fallas críticas en taller o emergencias.

Tabla 5.2: Resumen comparativo de variantes reparadas en taller vs terreno

En 5 años	Cantidad	TMPR
Mantenciones en terreno	7.059	21,8 min
Mantenciones en taller	18.585	8,2 hrs

a) Errores de diagnóstico en terreno

Retomando los casos reparados en terreno, se puede analizar el flujo de actividades seguido en las variantes involucradas. Esto evidenció tres fallas en el proceso, las que se detallan a continuación.

La primera es cuando el operador indica correctamente al mantenedor que la falla se puede reparar en terreno, pero entrega un diagnóstico errado de la falla (Figura 5-4). Esta falla ocurrió en 1.062 casos (4,14% de los casos totales), es decir, en promedio 212,4 casos por año. Cada vez que se genera este error de diagnóstico el proceso de mantención aumenta su duración en 142,2 minutos, es decir, alrededor de 503 hrs al año.

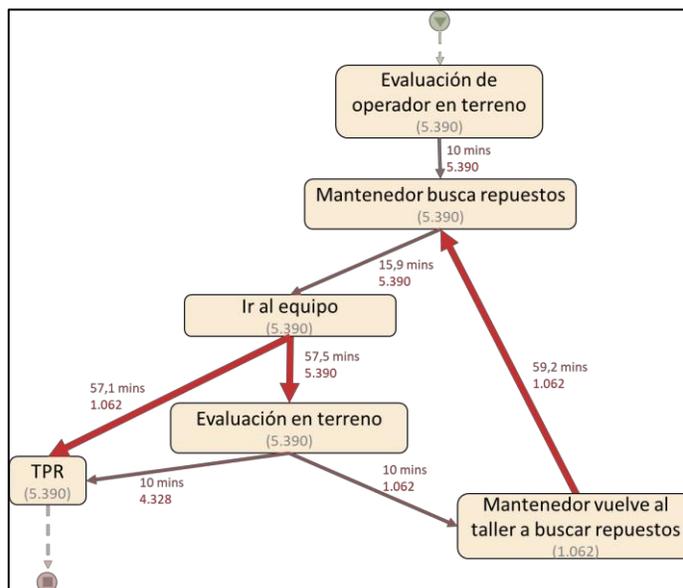


Figura 5-4: Flujo de proceso - Operador equivoca el diagnóstico. Fuente: (Elaboración propia).

El segundo error corresponde a cuando el operador indica que no se puede reparar en terreno, pero si se puede (Figura 5-5). Esta falla ocurrió en 1.669 casos (6,5% de los casos totales), es decir, en promedio 333,8 casos por año. Cada vez que se genera este error de diagnóstico el proceso de mantención aumenta su duración en 112,3 minutos, es decir, alrededor de 625 hrs al año.

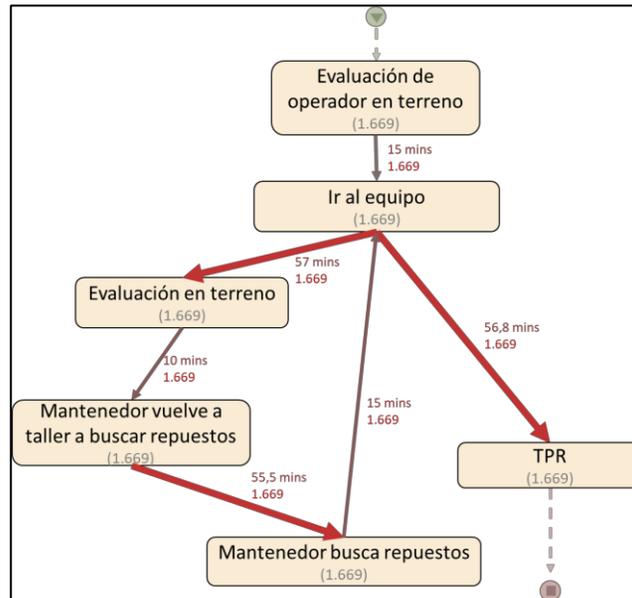


Figura 5-5: Flujo de proceso - Operador indica erróneamente que la falla no se puede reparar en terreno. Fuente: (Elaboración propia).

El tercer error correspondiente a la etapa de Diagnóstico/Evaluación inicial se produce cuando el operador indica que se puede reparar en terreno, pero no se puede (Figura 5-6). Esta falla ocurrió en 12.579 casos (49% de los casos totales), es decir, en promedio 2.515,8 casos por año. Cada vez que se genera este error de diagnóstico el proceso de mantención aumenta su duración en 16,2 minutos, es decir, alrededor de 679 hrs al año.

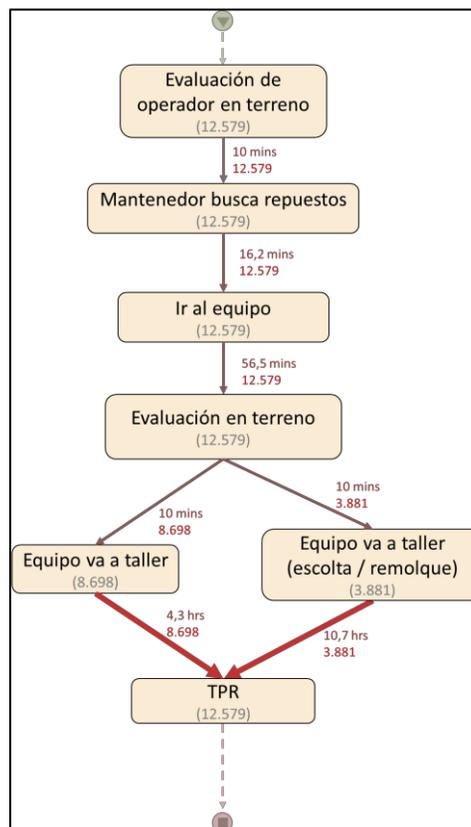


Figura 5-6: Flujo de proceso - Operador indica erróneamente que se puede reparar en terreno. Fuente: (Elaboración propia).

b) Definición de traslado a taller

Si se consideran los casos reparados en taller, podemos analizar el tiempo promedio desde la falla hasta que llegan a la actividad “Lavado” según si el operador solicita asistencia en terreno (16.335 casos – 63,7% de los casos totales) (Figura 5-7) o lleva el equipo directamente al taller (2.250 casos – 8,8% de los casos totales) (Figura 5-8). En el primer caso se observa que el tiempo promedio entre que el operador realiza la evaluación en terreno y llega al taller para lavado es de 287,7 min, mientras que en el segundo caso es de 73,9 min.

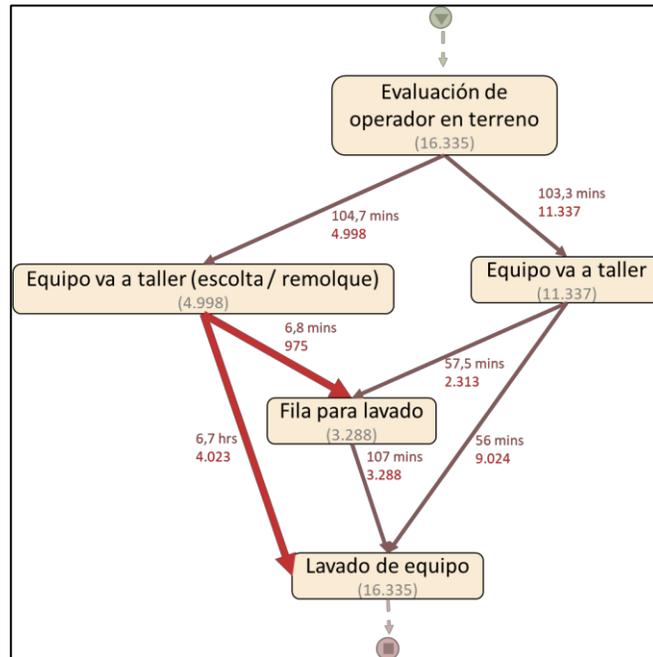


Figura 5-7: Flujo de proceso - Operador solicita asistencia en terreno del mantenedor.

Fuente: (Elaboración propia).

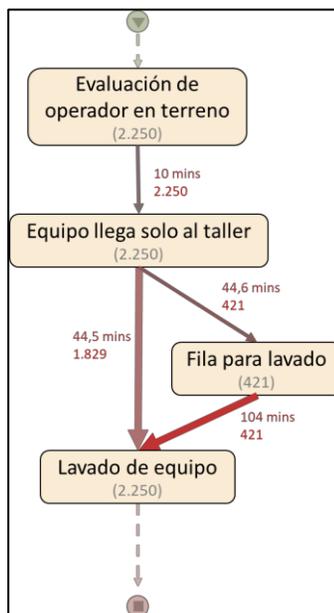


Figura 5-8: Flujo de proceso - Operador lleva el equipo directo al taller. Fuente:

(Elaboración propia).

Esta diferencia se da principalmente porque el 30,6% de los casos en que el operador solicitó el diagnóstico en terreno del mantenedor fue necesario el uso de remolque y escolta para llevar el equipo al taller, lo que tiene una duración media de 6,7 hrs, esto no ocurre en los casos en que el equipo está en condiciones para ser llevado directamente al taller.

De lo anterior se desprende que el 70% de las fallas en que se solicitó revisión en terreno no lo requerían y los equipos podrían haber sido llevados directamente al taller. Esto habría generado un ahorro de 213,7 min en 11.337 casos (44% de los casos totales), es decir, si el operador hubiera estado capacitado para tomar una mejor decisión, se podría haber aumentado en 8.076 hrs por año la disponibilidad de los equipos.

### 5.5.2. Tiempo de reacción

En cuanto al tiempo de reacción de los mantenedores, este se ve afectado por la acotada flota de camionetas, lo que en ocasiones obliga a esperar por una camioneta para poder ir al lugar donde se encuentra el equipo, como se ve en la Figura 5-9. En 7.038 (27,4% del total de casos), los mantenedores tuvieron que esperar camioneta, lo cual aumentó el tiempo de respuesta en 44 min por falla. Esto equivale a 1.407,6 demoras por año, es decir 1.032 hrs por año.

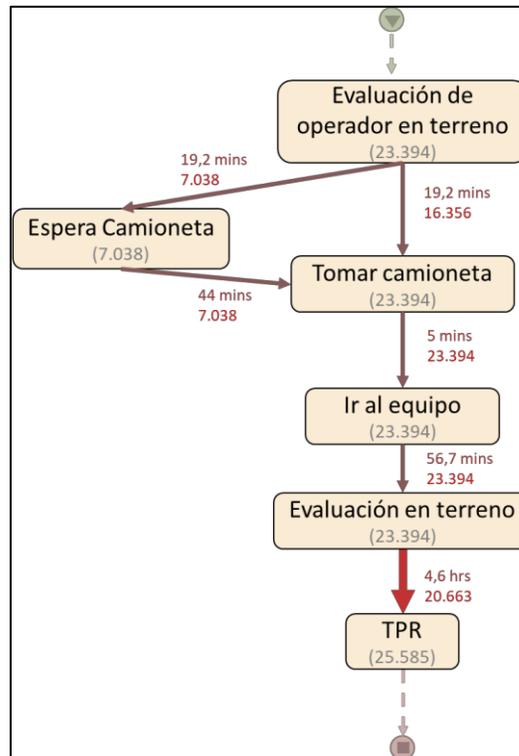


Figura 5-9: Flujo de proceso - Operador debe esperar por camioneta. Fuente:

(Elaboración propia).

### 5.5.3. Priorización de fallas

La tercera etapa clave del proceso corresponde al proceso de priorización de fallas, debido a que luego de que el operador solicita la atención y evaluación en terreno de la falla, esta será clasificada según si el equipo requiere ser remolcado y escoltado al taller (falla grave) o está en condiciones de llegar por sí solo a taller (falla leve). Esta característica es relevante a la hora de planificar qué tipo de fallas se tratarán con prioridad dado que se presentan 4.998 casos que deben ser remolcados, con un tiempo medio de traslado al taller de 6,7 hrs, mientras que hay 11.337 casos que llegan por sus medios al taller con un tiempo de traslado medio de 57 min. Es decir, se pueden ingresar aproximadamente 7 equipos con fallas leves en el mismo tiempo que se ingresa un equipo con falla grave.

Esto genera un *trade-off* que debe ser tomado en cuenta, debido a que las fallas leves presentan un comportamiento crónico, mientras que las fallas graves en general tienen un carácter agudo, como se presenta en la Tabla 5.3. Esto requiere tener ciertas consideraciones, entre las cuales se destaca que el tiempo de mantención efectiva de una falla aguda por lo general es mayor al de una falla crónica y que un equipo con falla aguda que no es retirado y llevado a taller puede obstruir una calle impidiendo su uso por parte de otros equipos.

Tabla 5.3: Resumen comparativo según gravedad de fallas reparadas en taller. Fuente:

(Elaboración propia).

Tipo de falla	Cantidad	Tiempo de traslado	Tiempo indisponible por traslado a taller
Fallas Leves	11.337	57 min	2.154 hrs/año
Fallas Graves	4.998	6,7 hrs	6.697 hrs/año

De este modo, es importante analizar el caso a caso para determinar si es posible posponer el ingreso de una falla aguda para acelerar el regreso a operación de los equipos con fallas crónicas y/o leves.

#### **5.5.4. Proceso de preparación**

El proceso de preparación se inicia una vez que el equipo ingresa a “Fila para lavado” y termina cuando llega al pozo de mantención (Figura 5-10). En esta etapa se encuentran varias actividades consideradas grasas del proceso, como son la fila para el lavado, espera por herramientas, desarme de equipo para reparar otro más crítico, pausa de la mantención para atender emergencias y espera de repuesto.

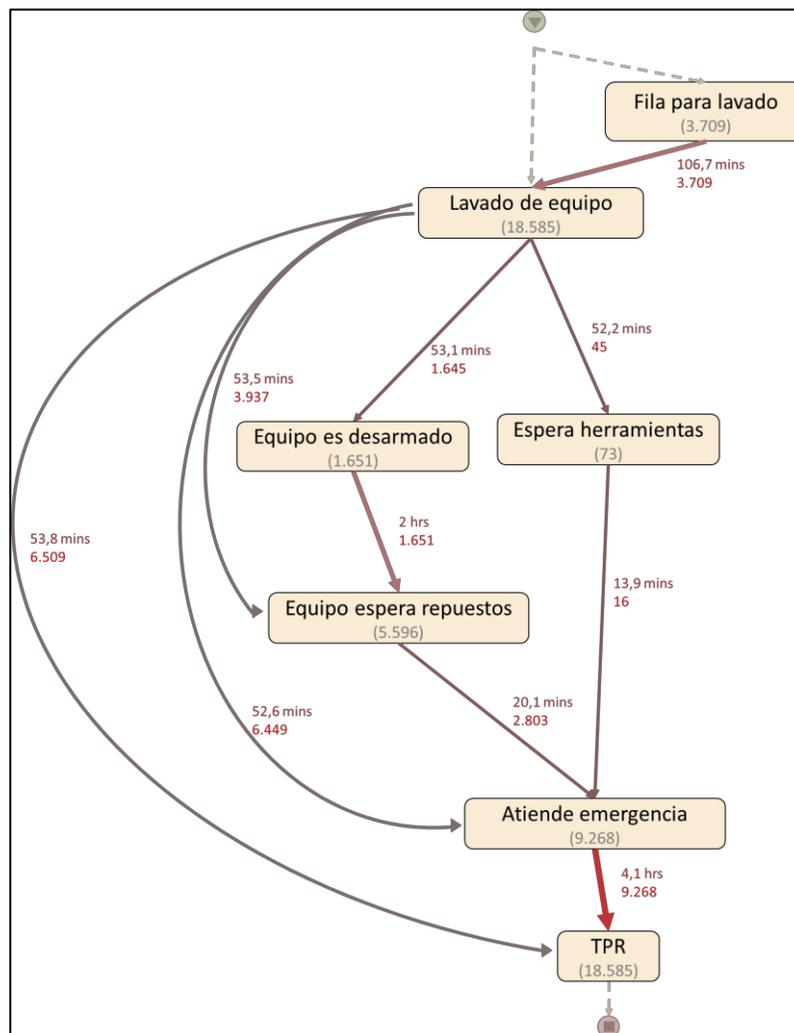


Figura 5-10: Flujo de proceso – Etapa de preparación. Fuente: (Elaboración propia).

Al respecto se puede mencionar que 9.268 (36,1% del total de casos) se debe pausar la tarea de mantención para atender alguna emergencia, lo que toma en promedio 246 min; en 3.709 (14,4% del total de casos) casos deben hacer fila previo a su ingreso a lavado lo que toma en promedio 106,7 min; en 73 (0,3% del total de casos) ocasiones el mantenedor debe esperar alguna herramienta por alrededor de 13,9 min; en 1.651 (6,4% del total de casos) casos el equipo debe ser desarmado para entregar

piezas a otro equipo con mayor prioridad para regresar a operaciones lo que toma en promedio 20,1 min; y en 5.596 (21,8% del total de casos) casos el equipo debe esperar por un repuesto cerca de 144 min.

En consideración de las magnitudes presentadas, se puede definir que la falta de herramientas corresponde a una falla marginal de bajo impacto en relación con las otras presentadas.

Cabe mencionar que las pérdidas operativas derivadas de esta etapa alcanzan en conjunto 9.958 hr/año.

#### **5.5.5. Mantención efectiva y regreso a operación**

Finalmente, la última etapa clave del proceso corresponde a la mantención efectiva y el regreso a operación (Figura 5-11), al respecto se encuentra que los 25.644 casos tienen un TMPR de 6,0 hrs, con una mediana de 4,6 hrs, lo cual indica que existen fallas agudas que desvían el tiempo medio para reparar. Por otro lado, 12.948 casos (50,5%) de los casos esperan en promedio 69 min para su retiro y regreso a operaciones, lo que equivale a pérdidas operativas de 2.978 hrs/año.

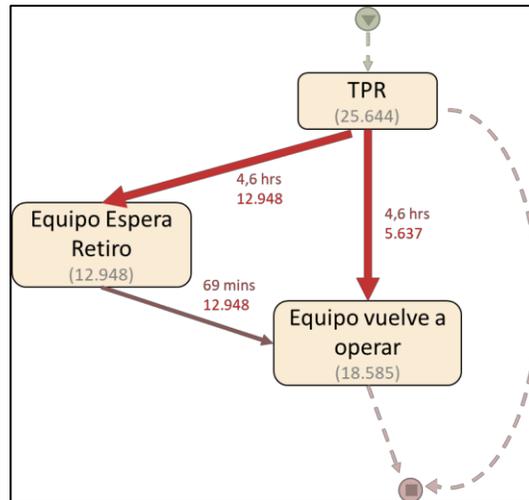


Figura 5-11: Flujo de proceso – Etapa de Mantenimiento efectiva y regreso a operación.

Fuente: (Elaboración propia).

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir del análisis realizado se obtuvo el tiempo ocioso equivalente para las diferentes grasas del proceso de mantención de los equipos LHD, dicho tiempo corresponde a tiempo que el equipo deja de trabajar por estar en proceso de mantención y por tanto conlleva un costo de oportunidad de no producir.

A continuación, en la Tabla 6.1, se presentan las oportunidades encontradas, dimensionadas en términos del tiempo ocioso generado y del costo de oportunidad asociado.

Tabla 6.1: Resumen de oportunidades encontradas. Fuente: (Elaboración propia).

Grasa Operacional	Cantidad de casos por año	Tiempo ocioso por falla	Tiempo ocioso anual	Costo de oportunidad
Diagnóstico inicial errado de la falla	212	142,2 min	503 hrs	24 KUSD/año
Operador indica erróneamente que no se puede reparar en terreno	334	112,3 min	625 hrs	29 KUSD/año
Operador indica erróneamente que si se puede reparar en terreno	2.516	16,2 min	679 hrs	32 KUSD/año
Operador solicita asistencia en terreno y podía ir solo	2.267	213,7 min	8.076 hrs	378 KUSD/año
Mantenedor debe esperar camioneta	1.408	44 min	1.032 hrs	48 KUSD/año
Pausa en mantención por emergencia	1.854	246 min	7.600 hrs	356 KUSD/año
Equipo espera lavado	742	106,7 min	1.319 hrs	62 KUSD/año
Espera herramienta	18	13,9 min	4 hrs	0,22 KUSD/año
Equipo es desarmado para arreglar otro	330	120 min	660 hrs	31 KUSD/año
Equipo espera repuesto	1.119	20,1 min	375 hrs	18 KUSD/año
Equipo espera regreso a operación	2.590	69 min	2.978 hrs	140 KUSD/año
<b>TOTAL</b>			<b>23.852 hrs</b>	<b>1,12 MUSD/año</b>

## 6.1. Posibles mejoras a raíz del análisis realizado

A continuación, se presenta un análisis de las fallas del proceso encontradas, según las horas operativas perdidas.

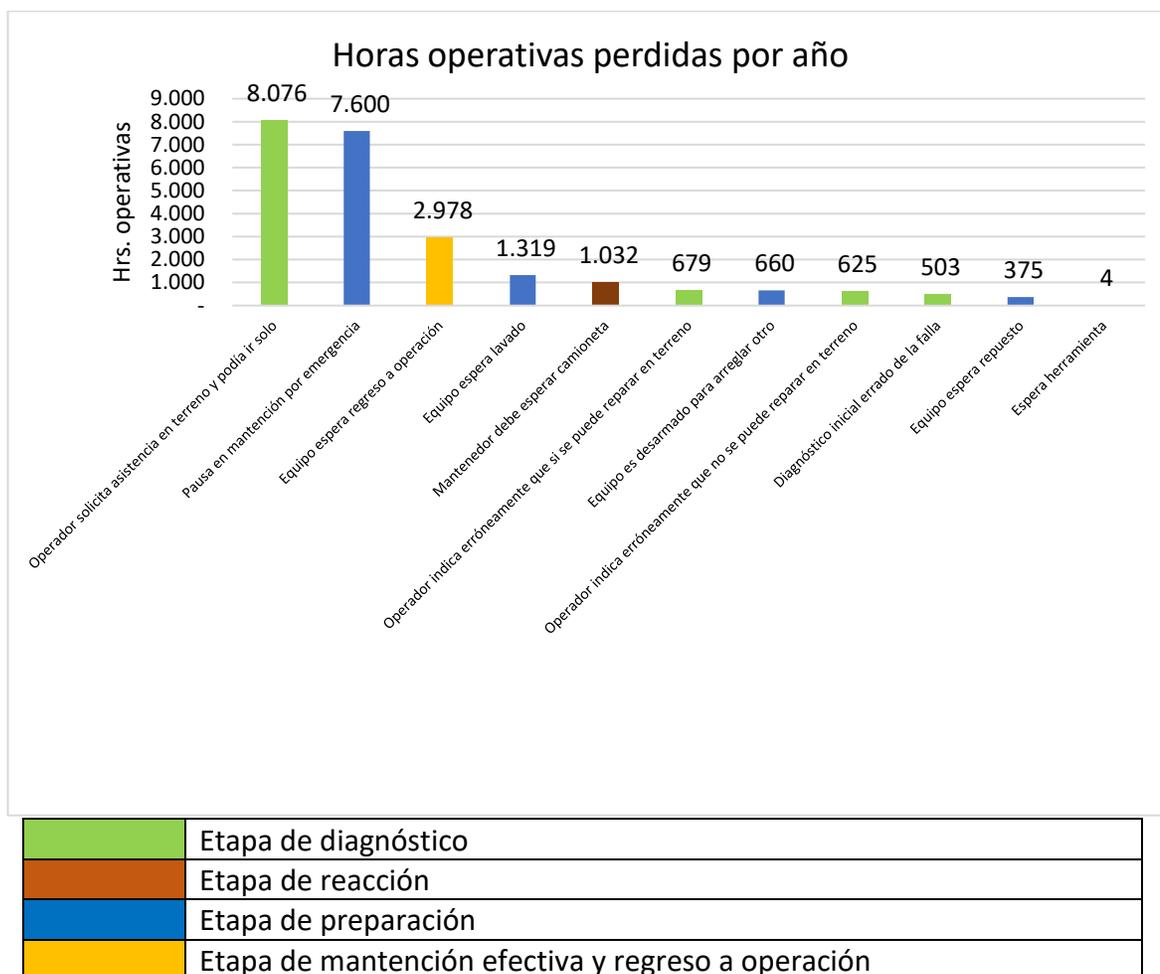


Figura 6-1: Pareto de impacto de fallas del proceso. Fuente: (Elaboración propia).

A partir de la Figura 6-1, se evidencia que el mayor impacto en horas operativas corresponde a un mal diagnóstico de parte del operador que solicita asistencia en terreno, pudiendo haberse desplazado por su cuenta al taller. Esto puede ser abordado mediante capacitaciones a los operadores, fortaleciendo la figura del

operador – mantenedor, lo que permitiría, además, abordar otras tres causas de pérdida operacional.

La segunda causa está dada por la detención de mantenciones para atender otros equipos que fallan y requieren atención urgente, esto debe ser analizado en profundidad para detectar la causa raíz de estos imprevistos y favorecer la continuidad operacional.

Por otro lado, la tercera causa corresponde a la espera del equipo para su retiro y regreso a operaciones, lo que corresponde a un factor de tipo logístico que debe ser abordado con urgencia dado el impacto que posee.

Respecto a la espera de lavado, si bien corresponde a un cuello de botella del proceso, se debe analizar si es económicamente factible construir otro pozo de lavado para agilizar el proceso. Además, se debe analizar si al haber más equipos lavados y preparados para la mantención existirá personal suficiente para tratar esta nueva demanda.

Finalmente, se debe evaluar la opción de tener más camionetas disponibles para evitar pérdidas operacionales por falta de atención en oportunidad y calidad debido a falta de vehículos.

## **6.2. Trabajo futuro propuesto**

A partir de los resultados del caso de estudio, se recomienda explorar la opción de realizar un piloto en un entorno operativo real para validar los resultados teóricos obtenidos en la presente investigación.

Ligado a lo anterior, se recomienda diseñar y desarrollar un sistema que se base en información obtenida a partir de sensores tipo portal (ubicado, por ejemplo, a la entrada del taller, en el pozo de lavado y en el pozo de mantenimiento) y de información cargada por los mismos operadores mediante sistemas digitales para mejorar la calidad y cantidad de datos disponibles para analizar durante el piloto.

Además, para efectos del piloto se recomienda analizar la opción de probar *softwares* de minería de proceso pagados de modo de testear el potencial de la tecnología en términos de análisis.

Sumado a esto, durante la captura de información se podría adicionar a los recursos analizados en este estudio la identificación del operador y los mantenedores dada su condición de actores clave del proceso.

## 7. CONCLUSIONES

Actualmente, los sistemas disponibles en la minería subterránea contienen una gran cantidad de datos en línea. Para gestionar a partir de estos datos se requiere de análisis avanzados con foco no sólo en los datos sino también en los procesos.

La implementación de minería de procesos requiere de un log de eventos con una estructura base definida por ID, actividad y tiempo, lo que no siempre se encuentra disponible para los procesos completos dada la complejidad del entorno minero.

En el estudio se presenta como nueva alternativa para la generación del log de eventos la utilización de simulación y criterio experto como complemento a los datos disponibles.

Para ello, se recopilaron y filtraron datos de fallas de equipos, con los que se simuló un sistema de producción y mantención que considera las fallas no planificadas de los diferentes sistemas de un equipo LHD y refleja las actividades realizadas desde la aparición de la falla hasta el regreso a operación del equipo. Esto permite la generación de un log de eventos apropiado a partir de la utilización de DES.

Además, se presentan oportunidades detectadas a partir del análisis de proceso. Estas corresponden a actividades y decisiones que generan pérdidas por equipo detenido, ya sea debido a reprocesos o a cuellos de botella.

El efecto de estas en cuanto a tiempo corresponde a aproximadamente 23.800 hrs de equipo detenido por año, con un costo, por no producción de cerca de 1,12 MUSD/año. La detección de estas brechas habilita la posibilidad de evaluar el caso a caso y definir acciones correctivas para lograr una mejor gestión del proceso de mantención.

En resumen, en el presente estudio se presenta la primera integración (*framework*) de DES y minería de procesos para generar un log de eventos desde data de bajo nivel en la mantención de equipos de minería subterránea. Además, del estudio se desprende que la implementación de minería de procesos dentro del ciclo de mantención de equipos tiene el potencial suficiente para evaluar la implementación de un piloto de prueba en condiciones operacionales, tal de definir su implementación como un estándar operativo.

## BIBLIOGRAFIA

Ali, D., & Frimpong, S. (2020). Artificial intelligence, machine learning and process automation: existing knowledge frontier and way forward for mining sector. *Artificial Intelligence Review*, 1-18.

Arif-Uz-Zaman, K., Cholette, M. E., Ma, L., & Karim, A. (2017). Extracting failure time data from industrial maintenance records using text mining. *Advanced Engineering Informatics*, 33, 388-396.

Barnewold, L., & Lottermoser, B. G. (2020). Identification of digital technologies and digitalisation trends in the mining industry. *International Journal of Mining Science and Technology*.

Beretta, F., Rodrigues, A. L., Peroni, R. L., & Costa, J. F. C. L. (2019). Automated lithological classification using UAV and machine learning on an open cast mine. *Applied Earth Science*, 128(3), 79-88.

BSI (1984). “BS 3811-Glossary of Maintenance Management Terms in Terotechnology.” British Standards Institute, London.

Bru, F.; Claes J. The perceived quality of process discovery tools. arXiv 2018, arXiv:1808-06475. Disponible en línea: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1808/1808.06475.pdf> (revisado en 13 de Agosto 2020)

Brzywczy, E., & Trzcionkowska, A. (2017). New possibilities for process analysis in an underground mine. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie/Politechnika Śląska*.

Brzywczy, E., & Trzcionkowska, A. (2018, September). Process-oriented approach for analysis of sensor data from longwall monitoring system. In *International Conference on Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance* (pp. 611-621). Springer, Cham.

Brzywczy, E., & Trzcionkowska, A. (2018, November). Creation of an event log from a low-level machinery monitoring system for process mining purposes. In *International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning* (pp. 54-63). Springer, Cham.

Brzywczy, E. (2019). An overview of data mining and process mining applications in underground mining. *Inżynieria Mineralna*, 21.

Brzywczy, E., Gackowiec, P., & Liebetrau, M. (2020). Data Analytic Approaches for Mining Process Improvement—Machinery Utilization Use Case. *Resources*, 9(2), 17.

Calder, P. (2000). *Tópicos de Ingeniería de Minas a Rajo Abierto*. Centro de Minería Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Consejo Minero (2021). *Cifras actualizadas de la minería*.

Cruelles Ruiz, J. A. (2010). *La teoría de la medición del despilfarro*. Toledo: Reverté Aguilar, SL.

Dutta, S., Bandopadhyay, S., Ganguli, R., & Misra, D. (2010). Machine learning algorithms and their application to ore reserve estimation of sparse and imprecise data. *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*, 2(02), 86.

Fuller, D. R. (2004). The production of copper in 6th century Chile's Chuquicamata mine. *JOM*, 56(11), 62-66.

He, Zhen, Wu, Qiong, Wen, Lijie, & Fu, Gui. (2019). A process mining approach to improve emergency rescue processes of fatal gas explosion accidents in Chinese coal mines. *Safety Science*, 111, 154-166.

Hyder, Z., Siau, K., & Nah, F. (2019). Artificial Intelligence, Machine Learning, and Autonomous Technologies in Mining Industry. *Journal of Database Management (JDM)*, 30(2), 67-79.

Galar, D., Naeem, H. B., Schunesson, H., Berges, L., & Tormos, B. (2014). Fusion of operations, event-log and maintenance data: a case study for optimising availability of mining shovels. In *Mine Planning and Equipment Selection* (pp. 1173-1194). Springer, Cham.

Gbadam, E., Awuah-Offei, K., & Frimpong, S. (2015). Investigation into Mine Equipment Subsystem Availability and Reliability Data Modeling Using Discrete Event Simulation.

Knights, P. (2005). Downtime priorities, jack-knife diagrams, and the business cycle. *Maintenance and asset management*, 19(4), 21-28.

Kulakli, A., & Birgun, S. (2020, September). Process Mining Research in Management Science and Engineering Fields: The Period of 2010–2019. In *The International Symposium for Production Research* (pp. 413-425). Springer, Cham.

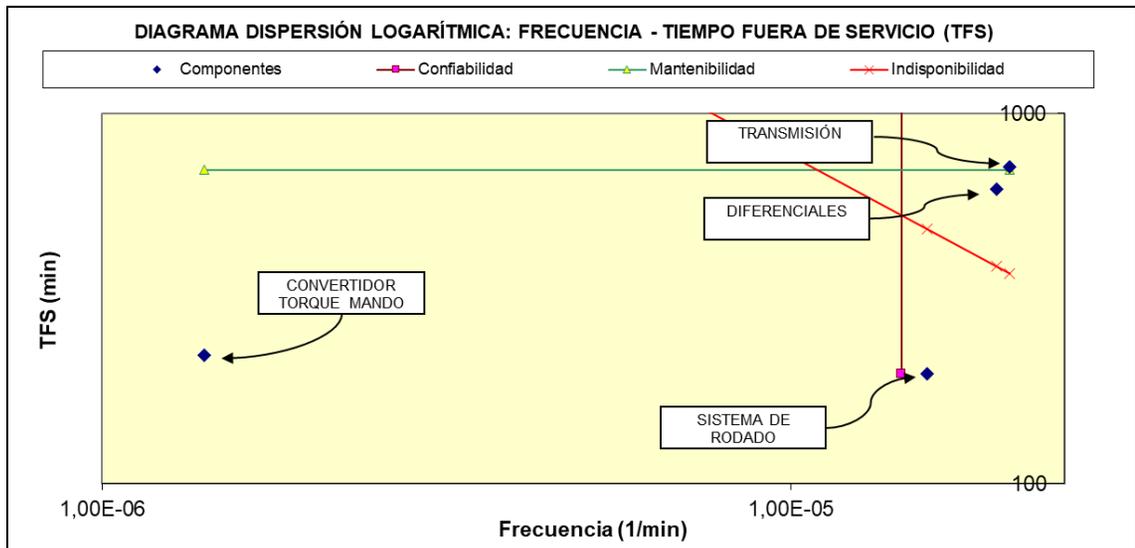
Leavengood, S., & Reeb, J. (2002). Part 3: Pareto analysis and check sheets. *Series: Performance Excellence in the Wood Products Industry, Extension & Station Communications OSU*, 1-8.

- Lee, J., Kao, H. A., & Yang, S. (2014). Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment. *Procedia Cirp*, 16(1), 3-8.
- Lee, C., Kim, S. M., & Choi, Y. (2019). Case Analysis for Introduction of Machine Learning Technology to the Mining Industry. *Tunnel and Underground Space*, 29(1), 1-11.
- Lewis, M. W., & Steinberg, L. (2001). Maintenance of mobile mine equipment in the information age. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*.
- Maheswari, C., Priyanka, E. B., Thangavel, S., Vignesh, S. R., & Poongodi, C. (2020). Multiple regression analysis for the prediction of extraction efficiency in mining industry with industrial IoT. *Production Engineering*, 14(4), 457-471.
- Marcin Szyrka, Edyta Brzywczy, Aneta Napieraj, Jacek Korski, & Grzegorz J. Nalepa. (2020). Conformance Checking of a Longwall Shearer Operation Based on Low-Level Events. *Energies (Basel)*, 13(6630), 6630.
- Matysek, A. L., & Fisher, B. S. (2016). *Productivity and innovation in the mining industry*. BAE research report.
- Meech, J. A. (2006, June). The evolution of intelligent systems in the mining industry. In *Proceedings of the international conference on mineral process modelling, simulation and control, Laurentian University, Sudbury, Ontario* (pp. 1-30).
- Ministerio de Minería de Chile (2018). Historia de la minería en Chile. Disponible en línea: <https://www.minmineria.cl/que-es-la-mineria/historia-de-la-mineria-en-chile/> (revisado en 30 de Agosto 2021).
- Morad, A. M., Pourgol-Mohammad, M., & Sattarvand, J. (2013, November). Reliability-centered maintenance for off-highway truck: case study of sungun copper mine operation equipment. In *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*.
- Moubray, J., (2000). *Reliability-centred Maintenance*. Lutterworth, United Kingdom: Aladon Ltd.
- Organización Internacional de Normalización. (2014). *Gestión de activos - Aspectos generales, principios y terminología* (ISO 55000). Disponible en línea: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:55000:ed-1:v2:es> (revisado en 18 de Julio 2021)

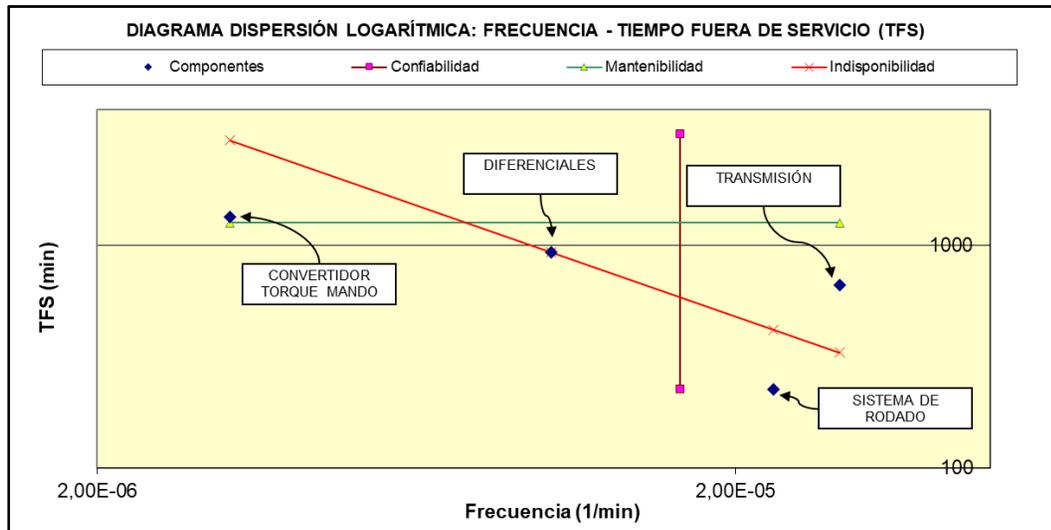
- Ouanan, H. (2019, December). Image processing and machine learning applications in mining industry: Mine 4.0. In *2019 International Conference on Intelligent Systems and Advanced Computing Sciences (ISACS)* (pp. 1-5). IEEE.
- Pascual, R. (2005). El arte de mantener. *Universidad de Chile*.
- Pinto, V. A., Cardoso, A. M. P., Pinheiro, M. M. K., & Parreiras, F. S. (2019). Interdisciplinarity in Data Science over Big Data: findings for mining industry. *Informação & Sociedade*, 29(4), 61.
- Prytz, R., Nowaczyk, S., Rögnvaldsson, T., & Byttner, S. (2013). Analysis of truck compressor failures based on logged vehicle data. In *9th International Conference on Data Mining, Las Vegas, Nevada, USA, July 22–25, 2013*. CSREA Press.
- Qi, C. C. (2020). Big data management in the mining industry. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 27(2), 131-139.
- Sadowski, R. P., Kelton, W. D., & Sadowski, R. P. (1998). *Simulation with ARENA*. McGraw-Hill.
- Selvik, J. T., & Ford, E. P. (2017). Down Time Terms and Information Used for Assessment of Equipment Reliability and Maintenance Performance. *System Reliability*, 43.
- Trzcionkowska, A., & Brzuchczy, E. (2018). Practical Aspects of Event Logs Creation for Industrial Process Modelling. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*, 1(1), 77-83. Doi.org/10.2478/mape-2018-0011.
- Van Der Aalst, W. (2016). Data science in action. In *Process Mining*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Viveros, P., Stegmaier, R., Kristjanpoller, F., Barbera, L., & Crespo, A. (2013). Proposal of a maintenance management model and its main support tools. *Ingeniare*, 125-138.
- Young, A., & Rogers, P. (2019). A Review of Digital Transformation in Mining. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 1-17.
- Zelinska, S. (2020). Machine learning: technologies and potential application at mining companies. In *E3S Web of Conferences. The International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2020)* (No. 166, pp. 1-5). EDP Sciences.

**ANEXOS**

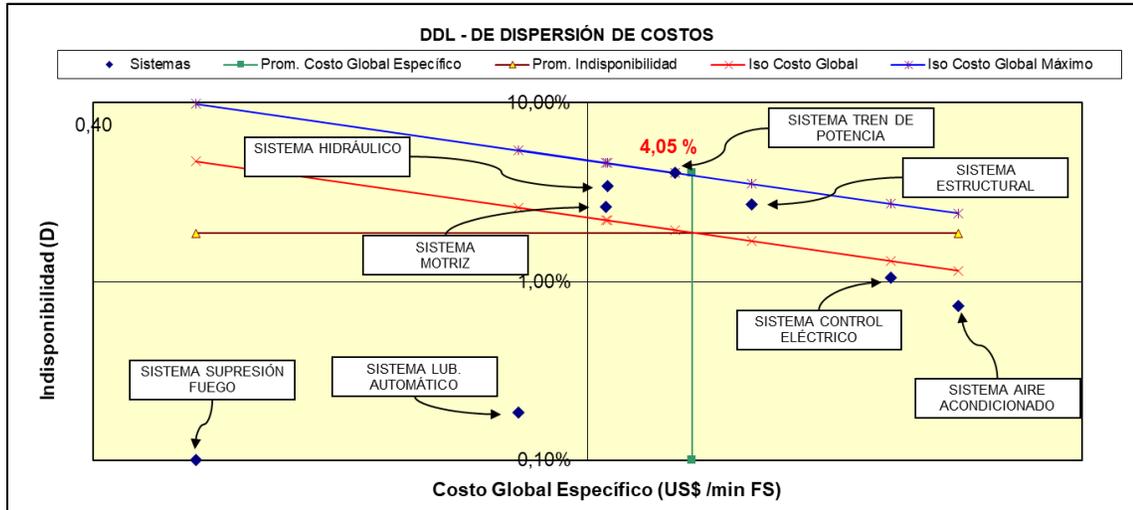
**ANEXO A : DIAGRAMA DE JACK KNIFE, COMPONENTES DEL SISTEMA DE TREN DE POTENCIA, 2018. (ELABORACIÓN PROPIA).**



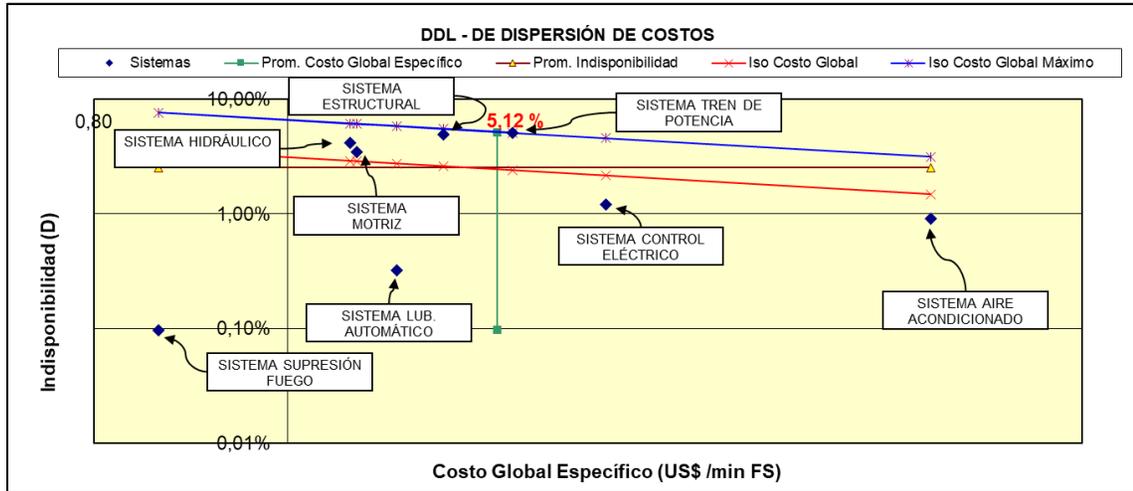
**ANEXO B : DIAGRAMA DE JACK KNIFE, COMPONENTES DEL SISTEMA DE TREN DE POTENCIA, 2019. (ELABORACIÓN PROPIA).**



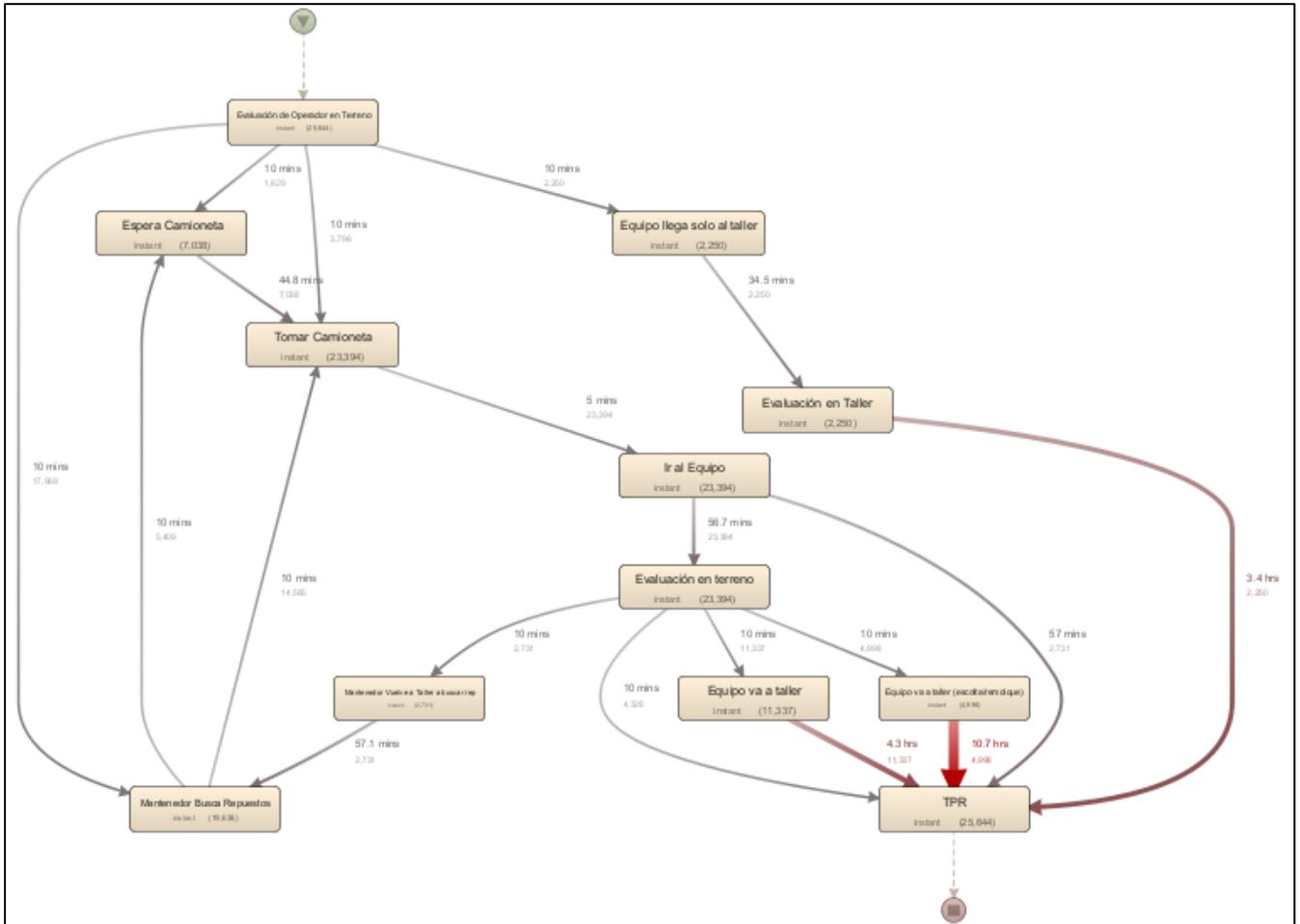
**ANEXO C : DIAGRAMA DE JACK KNIFE EN BASE A COSTO GLOBAL,  
FALLAS 2018. (ELABORACIÓN PROPIA).**



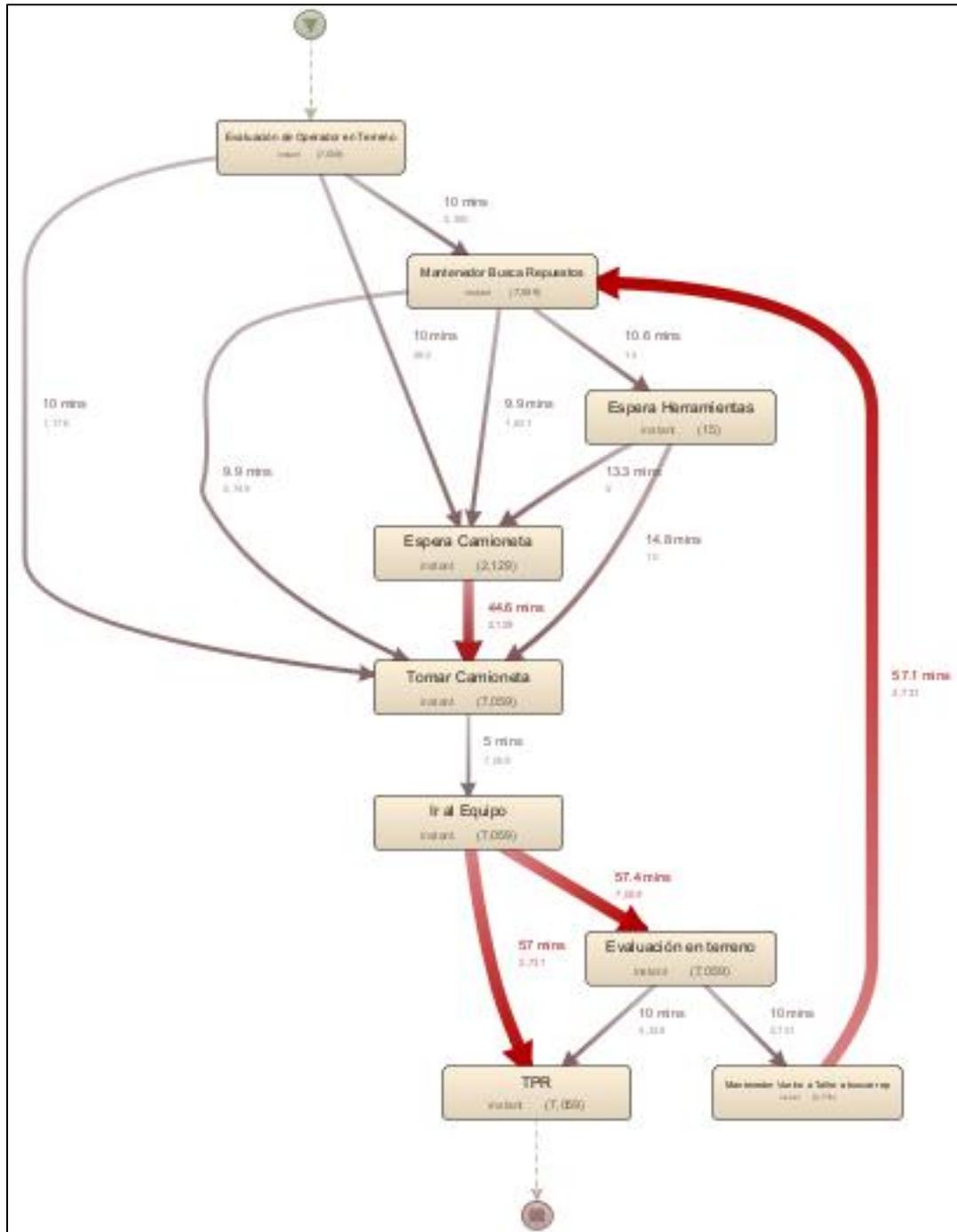
**ANEXO D : DIAGRAMA DE JACK KNIFE EN BASE A COSTO GLOBAL,  
FALLAS 2019. (ELABORACIÓN PROPIA).**



**ANEXO E : VISUALIZACIÓN BASE DE MINERÍA DE PROCESOS CON PRINCIPALES VARIANTES. FUENTE: (ELABORACIÓN PROPIA EN DISCO).**



**ANEXO F : FLUJO DE PROCESO - CASOS REPARADOS EN TERRENO.  
FUENTE: (ELABORACIÓN PROPIA EN DISCO).**

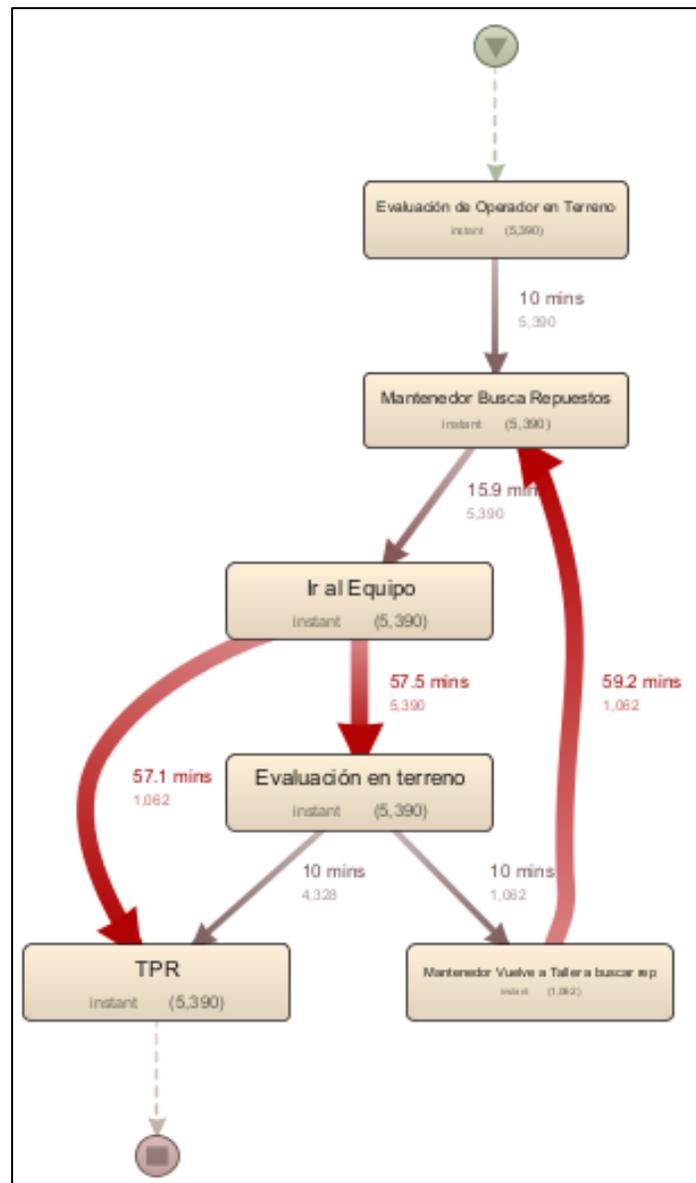






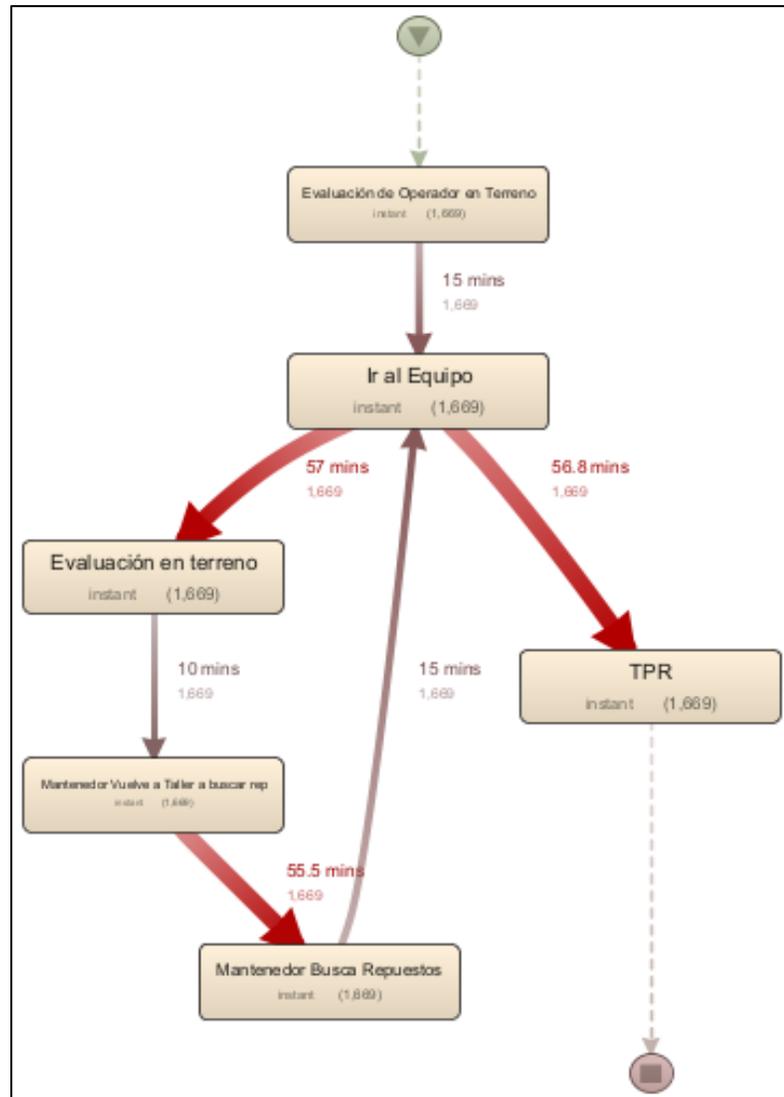


**ANEXO H : FLUJO DE PROCESO - OPERADOR EQUIVOCA EL  
DIAGNÓSTICO. FUENTE: (ELABORACIÓN PROPIA EN  
DISCO).**

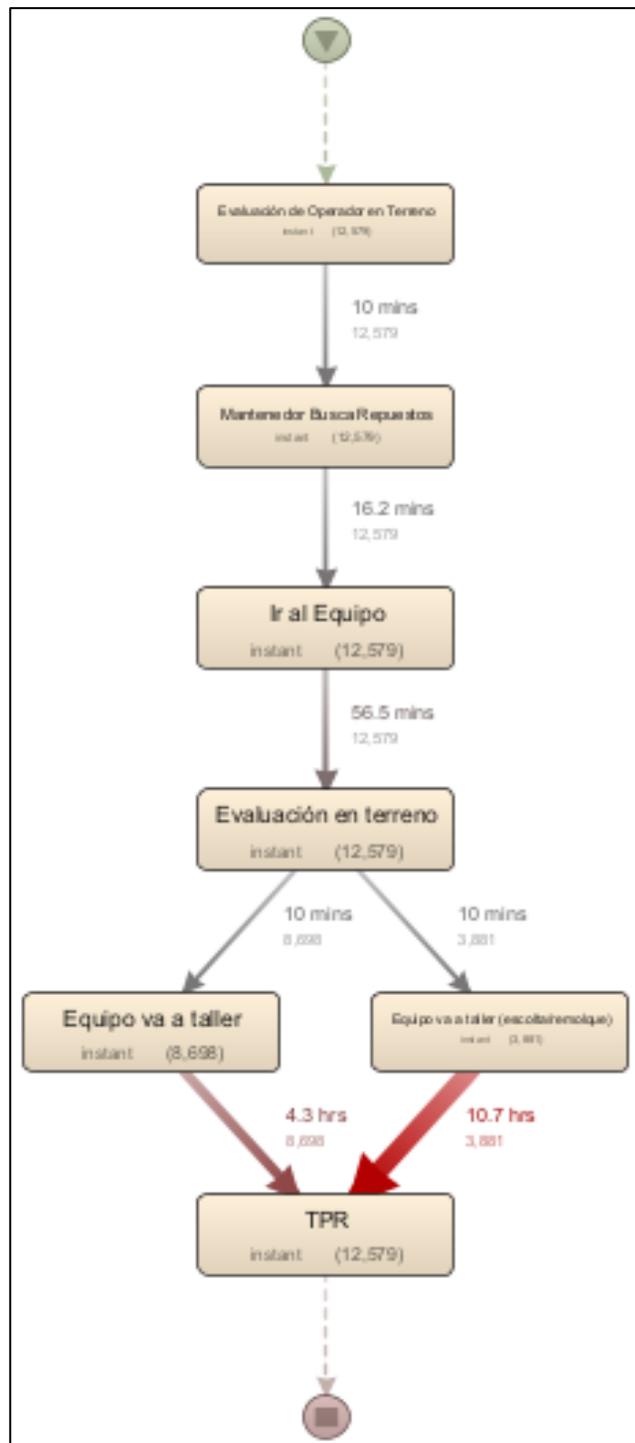




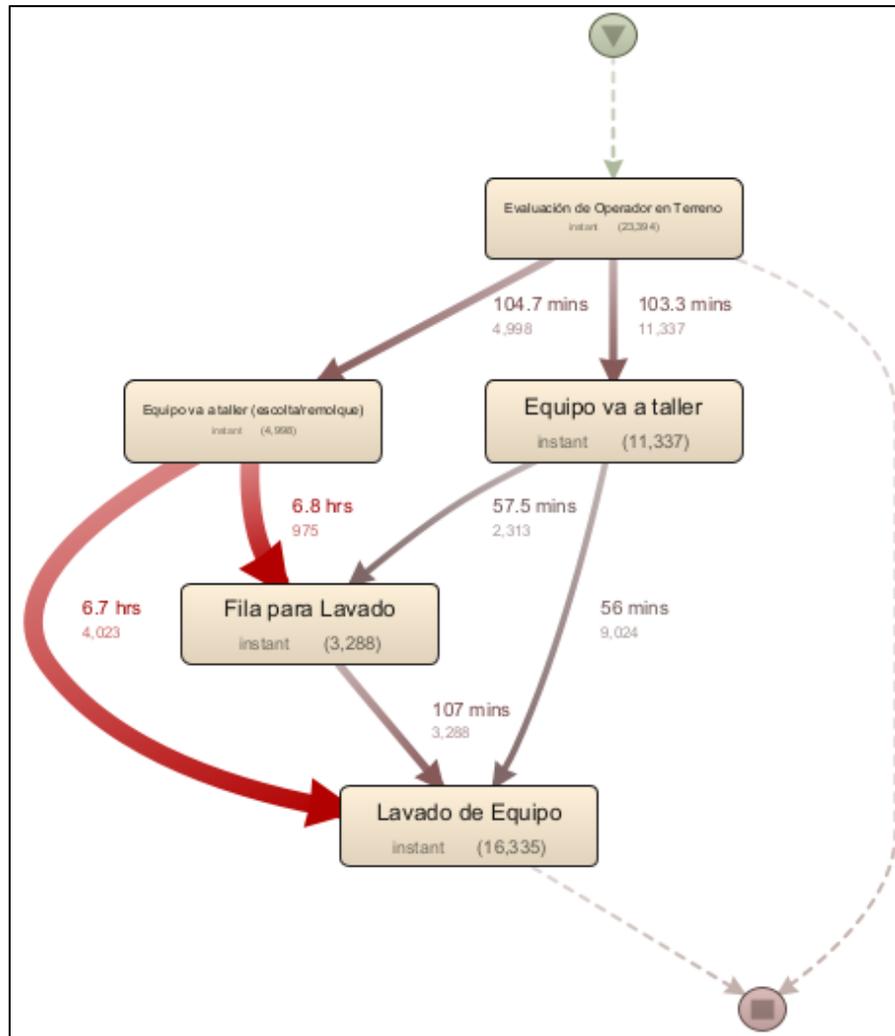
**ANEXO I : FLUJO DE PROCESO - OPERADOR INDICA  
ERRÓNEAMENTE QUE LA FALLA NO SE PUEDE REPARAR  
EN TERRENO. FUENTE: (ELABORACIÓN PROPIA EN DISCO).**



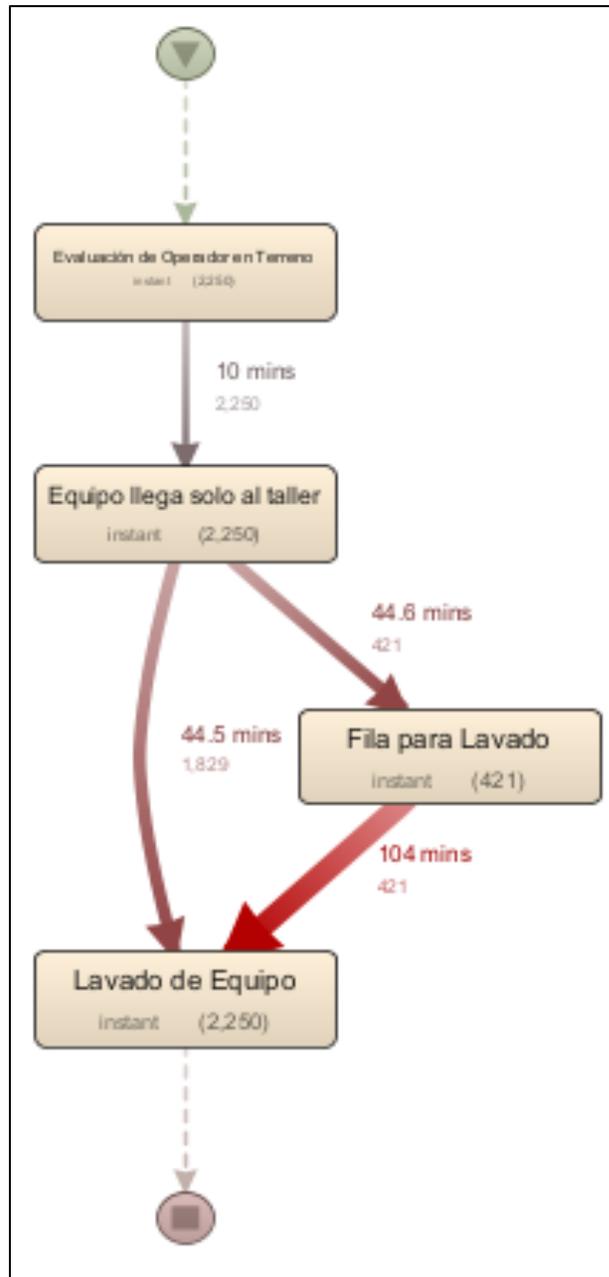
**ANEXO J : FLUJO DE PROCESO - OPERADOR INDICA  
ERRÓNEAMENTE QUE LA FALLA SE PUEDE REPARAR EN  
TERRENO. FUENTE: (ELABORACIÓN PROPIA EN DISCO).**



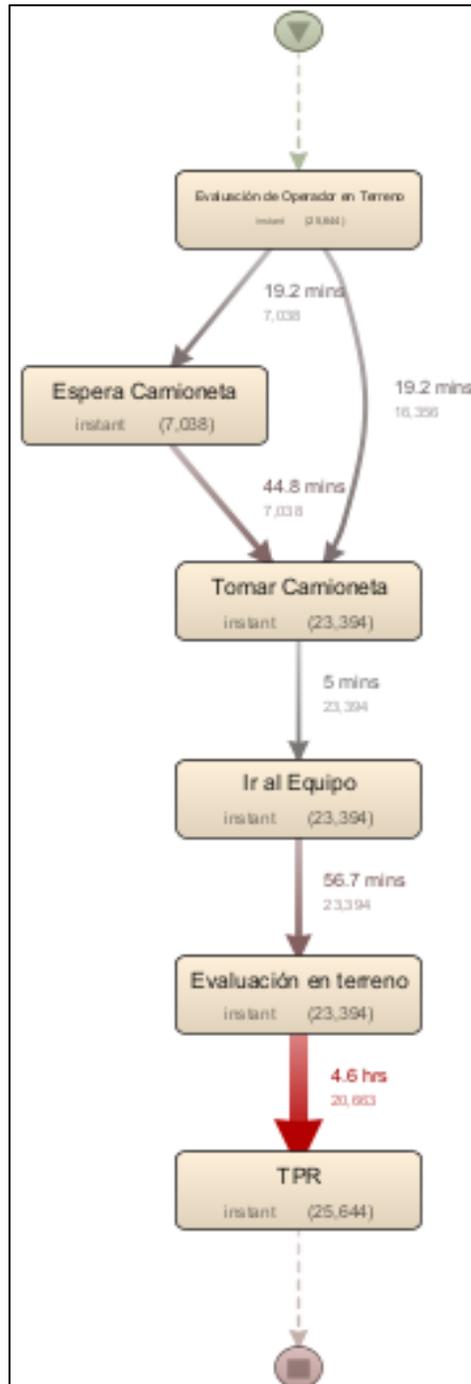
**ANEXO K : FLUJO DE PROCESO - OPERADOR SOLICITA ASISTENCIA EN TERRENO DEL MANTENEDOR. FUENTE: (ELABORACIÓN PROPIA EN DISCO).**



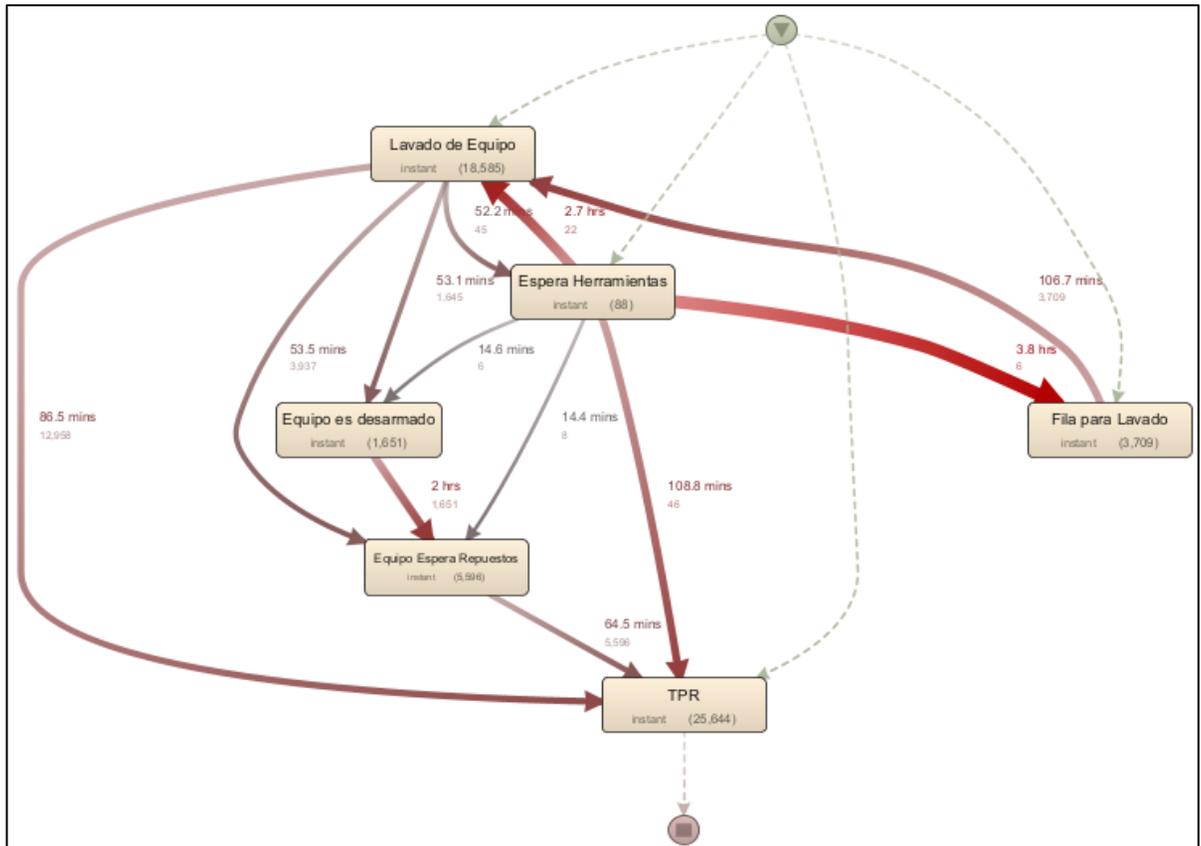
**ANEXO L : FLUJO DE PROCESO - OPERADOR LLEVA EL EQUIPO  
DIRECTO AL TALLER. FUENTE: (ELABORACIÓN PROPIA EN  
DISCO).**



**ANEXO M : FLUJO DE PROCESO - OPERADOR DEBE ESPERAR POR CAMIONETA. FUENTE: (ELABORACIÓN PROPIA EN DISCO).**



**ANEXO N : FLUJO DE PROCESO - ETAPA DE PREPARACIÓN. FUENTE:  
(ELABORACIÓN PROPIA EN DISCO).**



**ANEXO Ñ : FLUJO DE PROCESO - ETAPA DE MANTENCIÓN EFECTIVA  
Y REGRESO A OPERACIÓN. FUENTE: (ELABORACIÓN  
PROPIA EN DISCO).**

