

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE



**Mejorar indicadores de confiabilidad y planes de
mantenimiento de la flota de camiones de transporte
MT-65 de empresa minera.**

PABLO IGNACIO ARRIAGADA LEROY

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROFESOR GUÍA: MBA ING. LUIS GUZMÁN BONET
PROFESOR CORREFERENTE: MG. ING. EUGENIA TORRES

MARZO – 2020

Agradecimientos

Para poder llegar hasta esta instancia de mi vida, les doy el agradecimiento a mis padres Pablo Arriagada Acuña y Giselle Leroy Montt, por el constante apoyo económico, emocional y académico que me brindaron cada vez que lo necesite. A mis hermanos Constanza Arriagada Leroy, Marcela Ruiz Leroy, Nicolás Ruiz Leroy y Lukas Benavides Leroy, por su apoyo emocional y muestras de ánimo para poder culminar este proceso. No quiero dejar de agradecer a mi tío Marcelo Ruiz Bustamante (Q.E.P.D) por sus consejos y ejemplos que me dio en vida, los que me ayudaron a la disciplina necesaria para llegar al fin de mis estudios universitario.

Mis compañeros de universidad, que tuvieron la paciencia suficiente para poder ensañarme cada vez que lo necesite y de vivir bonitas experiencias fuera de las aulas.

A mi profesor guía Luis Guzmán Bonet por los consejos acertados que me dio para poder terminar este periodo de mi vida y desarrollarme de mejor forma en el mundo laboral.

También agradecer a la empresa minera, por la oportunidad de realizar mi memoria en su área de mantenimiento mina y por conocer de mejor forma como funciona este nuevo mundo.

Finalmente agradecer a todas las personas que me rodearon en esta etapa y que me ayudaron con un consejo, sonrisa, experiencia o cariño para tener el ánimo y fuerza necesaria para terminar este proceso.

Resumen

La empresa minera del norte de Chile, consta de tres minas subterráneas, la cuales operan desde el año 2018 con camiones de movimiento de mineral marca EPIROC modelo MT-65 que hasta la fecha, la flota se compone de 20 equipos, los cuales se han ido integrando a la empresa paulatinamente.

Los encargados de los mantenimientos de los equipos recién nombrados es el departamento de mantenimiento mina, quienes han incorporado como políticas de mantenimiento a estos equipos las de mantenimiento correctivo y preventivo. La política preventiva es realizada cada 250 horas teniendo cuatro tipos de pautas diferentes: 250 horas, 500 horas, 1000 horas y 2000 horas, cuyos costos varían desde los USD\$ 1.411,87 hasta los USD\$ 4.575,27.

A parte del mantenimiento preventivo, también se aplica el mantenimiento correctivo, el cual se ejerce al momento de que un sistema, sub-sistema o componente falla y consisten en reparar o cambiar lo fallado. Esta política produce tiempos de paradas de los equipos no deseable y por lo tanto influye en la confiabilidad y disponibilidad planeada para la flota, es por esto que se realizó un análisis y se determinó que los camiones que tienen este índice más bajo es el 1 y el 4, por lo que se necesita buscar mejoras para incrementar el índice en estos equipos.

Con el fin de determinar cuáles son los componentes de los equipos 1 y 4 que afectan a la baja disponibilidad y confiabilidad de estos, se realizan diagramas Jack – Knife empezando por los sistemas de los camiones hasta llegar a los componentes que más afectan los índices estudiados. Comprobando así que en el camión 1 los neumáticos afectan en el índice de disponibilidad y confiabilidad del equipo y el termostato del aire acondicionado afecta la disponibilidad; y para el camión 4 los flexibles de la transmisión influyen en la baja disponibilidad y confiabilidad del equipo.

La técnica utilizada para encontrar mejoras a los componentes recién nombrados es la del MAFEC (Metodología de Análisis de Fallas sus Efectos y Criticidad), con la cual se pueden encontrar todas las posibles fallas y su criticidad correspondiente, para así poder determinar las posibles causas que originan los inconvenientes.

Con las causas de las posibles fallas de cada componente, se proponen mejoras para mitigarlas o minimizarlas, las cuales abarcan nuevas tareas para las pautas de mantenimiento, integración de una política de mantenimiento predictivo, además de trabajar en conjunto con el área de operaciones mina. Algunas de estas mejoras son solo inspecciones o seguimiento del estado del componente, otras vienen asociadas a un costo para realizar el cambio del componente y compras de instrumentos.

Al finalizar, los costos son aumentado, donde en la pauta de 500 horas asciende en USD\$ 270.14 y para los gastos en instrumentos e insumos serán en total USD\$ 78.45 por equipo.

Abstract

The mining company the north of Chile, has three underground's mines, which operate since the year 2018 with trucks brand EPIROC model MT-65, for mineral movement, whose fleet consist in 20 equipment s, which have been added gradually.

The managers of the maintenance service of the trucks, is mine maintenance department, who have integrated as upkeep politics of these equipment's, the politics of preventive and corrective upkeep, Preventive politic is making every 250 hours, and has four different guidelines: 250 hours, 500 hours, 1000 hours, 2000 hours, which cost are between 1.411,87 USD and 4.575,27 USD.

On the other hand of the maintenance department use the corrective upkeep, which applies when a system, sub system or a component fails, and consist in repair or change the part that had failures. This politic produce unwanted stop times and this affect the availability of the trucks fleet, for this reason an analysis was executed and it determined that trucks has the rate of unwanted stop times and the equipment of has the low rate are 1 and 4, for that needed search improvements for increase the rate in y hear equipment's.

With final purpose of determine which are the components in trucks 1 and 4, that affect the low availability of this, Jack- Knife diagrams are made, starting for the trucks systems to the components that generate more impact for the rate in study, checking that in truck 1 the tires and air conditioner thermostat affect the availability of the equipment, and on the other hand in truck 4 the flexible transmission is the component that reduce the availability of the truck.

The technique used for find upgrades in the component before named is the one of MAFEC (failure mode, effects, and criticality analysis), finding all the possible failures causes according mine conditions where are working.

With the causes of the possible failures of each component, improves are proposed to mitigate or minimize, which ones attempt new tasks for the maintenance guidelines, also the integration a politics of preventive and corrective maintenance, besides to co-work with mine operations area.

Some of these upgrades, are just an inspection of tracking of the state of the component, another ones are associated to a monetary cost, for the change of the component or the purchase of instruments.

At the end, the cost are increased, where in the 500 hours schedule it amounts to 270.14 USD and for the expenses in instruments and supplies cost are a total of 78.45 USD per equipment.

Glosario

- MTBF: Tiempo Medio Entre Fallas.
- MTTR: Tiempo Medio de Reparación.
- TFS: Tiempo Fuera de Servicio.
- MAFEC: Metodología de Análisis de Fallas sus Efectos y Criticidad
- RPN: Número de prioridad de riesgo

Índice

Agradecimientos	ii
Resumen.....	iii
Abstract	v
Glosario	vi
Índice	vii
Índice de tablas	x
Índice de ilustraciones.....	xi
Introducción	xii
Objetivos	xiii
Objetivo general.....	xiii
Objetivos específicos.....	xiii
Plan de trabajo	xiv
1. Antecedentes generales de la empresa.....	16
1.1 Breve reseña de la empresa	16
1.2 Ubicación.....	16
1.3 Producción.....	17
1.4 Principales Clientes.	17
2. Marco Teórico.	18
2.1 Mantenimiento.	18
2.2 Políticas de Mantenimiento.....	19
2.2.1 Mantenimiento Correctivo.....	19
2.2.2 Mantenimiento Preventivo.	20
2.2.3 Mantenimiento Predictivo.	21
2.2.4 Mantenimiento Proactivo.	21
2.3 Confiabilidad.....	22
2.3.1 Relación entre fiabilidad y probabilidad de falla.....	22
2.3.2 Tasa de Falla $\lambda(t)$	23
2.3.3 Las fases de vida de la máquina.	23
2.3.4 Distribución Weibull.....	24
2.3.5 Métodos de Rangos Promedio.	26

2.3.6	Ranking ajustado con datos censurados a la derecha.	27
2.3.7	Disponibilidad.....	27
2.4	Diagrama de dispersión.....	29
2.5	Metodología de Análisis de Fallas sus Efectos y Criticidad.	30
3.	Situación actual de la flota.....	32
3.1	Especificaciones técnicas.	32
3.1.1	Capacidad y dimensiones.....	33
3.1.2	Motor y velocidades.....	33
3.2	Estructura técnica del MT-65.....	33
3.2.1	Sistemas.....	34
3.3	Mantenimiento Preventivo.	36
3.4	Metodología.....	37
3.5	Índices.	37
4	Análisis de confiabilidad.....	41
4.1	Parámetros Weibull.....	42
4.1.1	Análisis Weibull CAMMT65001.....	42
4.1.2	Análisis Weibull CAMMT65004.....	45
4.2	Análisis Jack – Knife.....	48
4.2.1	Jack – Knife CAMMT65001.....	48
4.2.2	Jack – Knife CAMMT65004.....	53
5	Oportunidades de Mejora.....	56
5.1	MAFEC Neumáticos.....	57
5.1.1	Mejoras para los neumáticos.....	59
5.2	MAFEC Termostato.....	59
5.2.1	Mejoras en el termostato.....	61
5.3	MAFEC Flexibles.....	62
5.3.1	Mejoras a los flexibles.....	62
5.4	Propuesta de nuevas pautas de mantenimiento	63
6	Costos asociados.....	66
	Conclusiones.....	67
	Referencias.....	69
	Anexos.....	70
	Anexo A: Datos.....	71

Anexo B: Parámetros Weibull	82
Anexo C: Datos Jack – Knife.	98
Anexo D: Tablas MAFEC	101

Índice de tablas

Tabla 1: Extracción (TON) mensual del año 2018 en las minas.....	17
Tabla 2: Velocidades alcanzadas por cada marcha. (Fuente propia)	33
Tabla 3: Sistemas que componen al camión MT-65	34
Tabla 4: MTTR del 2018 para los camiones desde el número 1 al 17 (Fuente propia)	38
Tabla 5: MTBF del 2018 para cada camión. (Fuente propia)	39
Tabla 6: Disponibilidad del 2018 para camión. (Fuente propia)	41
Tabla 7: Parámetros Weibull CAMMT65001 (Fuente propia).....	43
Tabla 8: Parámetros Weibull CAMMT65004 (Fuente propia).....	46
Tabla 9: Datos de frecuencia y MTTR de los sistemas del camión 1. (Fuente propia).....	49
Tabla 10: Datos de frecuencia y MTTR de los sub-sistemas del tren de potencia del camión 1. (Fuente propia).....	50
Tabla 11: Datos de frecuencia y MTTR de los sub-sistemas de la cabina del camión 1. (Fuente propia)	51
Tabla 12: Datos de frecuencia y MTTR de los componentes del aire acondicionado del camión 1. (Fuente propia).....	52
Tabla 13: Datos de frecuencia y MTTR de los sistemas del camión 4. (Fuente propia).....	53
Tabla 14: Datos de frecuencia y MTTR de los sub-sistemas del tren de potencia del camión 4. (Fuente propia).....	54
Tabla 15: Datos de frecuencias de fallas y MTTR de los componentes de la transmisión del camión 4. (Fuente propia).....	55
Tabla 16: MAFEC neumáticos CAMMT65001. (Fuente propia)	58
Tabla 17: MAFEC del termostato del aire acondicionado del camión 1. (Fuente propia)	61
Tabla 18: MAFEC de los flexibles de la transmisión del camión 4. (Fuente propia)	62
Tabla 19: Listado de las tareas actuales y propuestas para la pauta de 250 horas. (Fuente propia).....	64
Tabla 20: Listado de las tareas actuales y propuestas para la pauta de 500 horas. (Fuente propia).....	65
Tabla 21: Costos de la pauta de 250 horas actual y propuesta. (Fuente propia)	66
Tabla 22: Costos de la pauta de 500 horas actual y propuesta. (Fuente propia)	67
Tabla 23: Gastos por implementar mejoras. (Fuente propia).....	67
Tabla 24: Desglose del camión MT-65. (Fuente propia)	76
Tabla 25: Datos de paradas del CAMMT65001 para el 2018. (Fuente propia).....	79
Tabla 26: Datos de paradas del CAMMT65004 para el 2018. (Fuente propia).....	82
Tabla 27: Ranking de eventos fallas ajustadas CAMMT65001 (Fuente propia).....	85
Tabla 28: Calculo función de falla acumulada CAMMT65001 (Fuente propia).....	87
Tabla 29: Linealización de la función de falla acumulada y el tiempo del CAMMT65001 (Fuente propia)	89
Tabla 30: Confiabilidad, probabilidad de falla y tasa de falla por hora del CAMMT65001 (Fuente propia)	90
Tabla 31: Ranking de eventos fallas ajustadas CAMMT65004 (Fuente propia).....	92
Tabla 32: Calculo función de falla acumulada CAMMT65004 (Fuente propia).....	95
Tabla 33: Linealización de la función de falla acumulada y el tiempo del CAMMT65004 (Fuente propia)	97

Tabla 34: Confiabilidad, probabilidad de falla y tasa de falla por hora del CAMMT65004. (Fuente propia)	98
Tabla 35: Árbol de falla con frecuencias y MTTR para el 2018 del camión 1 (Fuente propia).....	100
Tabla 36: Árbol de falla con frecuencias y MTTR para el 2018 del camión 4 (Fuente propia).....	101
Tabla 37: Tabla de Severidad MAFEC (Artigas, 2020)	103
Tabla 38: Tabla de valoración de ocurrencia. (Artigas, 2020).....	103
Tabla 39: Tabla de valoración de la detectabilidad. (Artigas, 2020)	103

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Plan de trabajo. (Fuente propia)	xiv
Ilustración 2: Graficas representativas de $R(t)$ y $F(t)$ en función del tiempo. (Torres, 2016)	23
Ilustración 3: Representación de la tasa de falla en función del tiempo. (esacademi.com, 2020) ..	24
Ilustración 4: Ejemplo de formato de un gráfico Jack – Knife. (Knights, 2001).....	30
Ilustración 5: Camión MT-65. (Fuente propia).....	32
Ilustración 6: Gráfico de la taxonomía del camión MT-65	35
Ilustración 7: Gráfico del MTTR en función de cada camión para el 2018 (Fuente propia)	39
Ilustración 8: Gráfico del MTBF en función de cada camión para el año 2018. (Fuente propia).....	40
Ilustración 9: Gráfico disponibilidad del 2018 en función de cada camión. (Fuente propia)	41
Ilustración 10: Gráfico Weibull CAMMT65001 (Fuente propia)	43
Ilustración 11: Grafica de $R(t)$ y $F(t)$ en función del tiempo del camión 1(Fuente propia)	44
Ilustración 12: Gráfico de la tasa de falla ($\lambda(t)$) en función del tiempo del camión 1. (Fuente propia)	44
Ilustración 13: Gráfico Weibull CAMMT65004 (Fuente propia)	46
Ilustración 14: Grafica de $R(t)$ y $F(t)$ en función del tiempo camión 4 (Fuente propia)	47
Ilustración 15: Gráfico de la tasa de falla ($\lambda(t)$) en función del tiempo del camión 4.(Fuente propia)	47
Ilustración 16: Gráfico de dispersión para los sistemas del camión 1. (Fuente propia)	49
Ilustración 17: Diagrama Jack - Knife de los sub-sistemas del tren de potencia del camión 1. (Fuente propia).....	50
Ilustración 18: Diagrama Jack - Knife de los sub-sistemas de la cabina del camión 1. (Fuente propia)	51
Ilustración 19: Diagrama Jack - Knife de los componentes del aire acondicionado del camión 1. (Fuente propia).....	52
Ilustración 20: Gráfico de dispersión para los sistemas del camión 4. (Fuente propia)	54
Ilustración 21: Diagrama Jack - Knife de los sub-sistemas del tren de potencia del camión 4. (Fuente propia).....	55
Ilustración 22: Diagrama Jack - Knife de los componentes de la transmisión del camión 4.(Fuente propia).....	56

Introducción

El principal objetivo de una empresa minera es la de vender la mayor cantidad de mineral posible al menor costo, esto se logra gracias a la ayuda de los camiones de movimiento de mineral, los cuales trasladan el mineral desde su yacimiento hasta el inclinado, es por esto que es primordial que estén constantemente disponibles estos equipos para el área de operaciones, ya que de lo contrario el mineral no llega hasta su destino, influyendo en la disminución de producto final que se pueda comercializar

El departamento de mantenimiento mina entrega un servicio al área de operaciones mina, cuyo principal objetivo es el de tener los equipos disponibles al menor costo posible. Esto lo logra por medio de diversas políticas de mantenimiento, dentro de las cuales existe el mantenimiento correctivo, preventivo, predictivo y proactivo, cuya implementación dependerá de las necesidades, tiempos y costos.

Debido a la constante necesidad de bajar los costos de mantenimiento de la empresa y mejorar las pautas de mantenimiento, es que se hace primordial el buscar constantemente mejoras para las fallas que le ocurren a los equipos, por este motivo que es de suma importancia la información que se maneja de cada falla, entre las que destacan los tiempos de reparación, la cantidad de veces que se repite cada una de las fallas, cuanto tiempo demora en volver a fallar el equipo y los costos asociados a componer cada uno de los imprevistos. Al poder recolectar toda esta información, los ingenieros del área realizan estudios y análisis de cada falla con el fin de minimizar los costos y aumentar la disponibilidad de los equipos haciéndolos más confiables para la operación.

La empresa minera del norte de Chile, actualmente consta de camiones marca EPIROC modelo MT-65, cuya flota empezó a operar paulatinamente en el año 2018, por ende sus estudios asociados a las fallas no son muchos y al ser nuevos sus pautas de mantenimiento, tal vez no cubren todas los componentes del equipo, es por este motivo que se realiza esta tesis, cuyo principal objetivo es la de mejorar los indicadores de confiabilidad y los planes de mantenimiento que tienen estos camiones.

Al finalizar esta investigación se encontraran mejoras en las pautas de mantenimiento y acciones que aumentaran los índices de disponibilidad y confiabilidad de los equipos críticos de esta flota, tratando siempre de que estas propuestas sean al mejor costos posible y así ayudar al aumento del flujo de materia prima de esta empresa.

Objetivos

Objetivo general

- Mejorar los indicadores de confiabilidad y los planes de mantenimiento que tienen los camiones de transporte MT-65 de empresa minera.

Objetivos específicos

- Realizar un diagnóstico de la situación actual de la flota, que incluya la descripción, la caracterización de los equipos y la evaluación, en base a datos históricos.
- Realizar un análisis de confiabilidad a los equipos y componentes críticos.
- Determinar las oportunidades de mejora en base al diagnóstico realizado, jerarquizando de acuerdo a criterios de criticidad.
- Proponer nuevas pautas de mantenimiento a los equipos críticos.
- Determinar los costos asociados a la nueva propuesta de mantenimiento.

Plan de trabajo

El plan con el que se trabajará para poder llegar a los resultados esperados es:

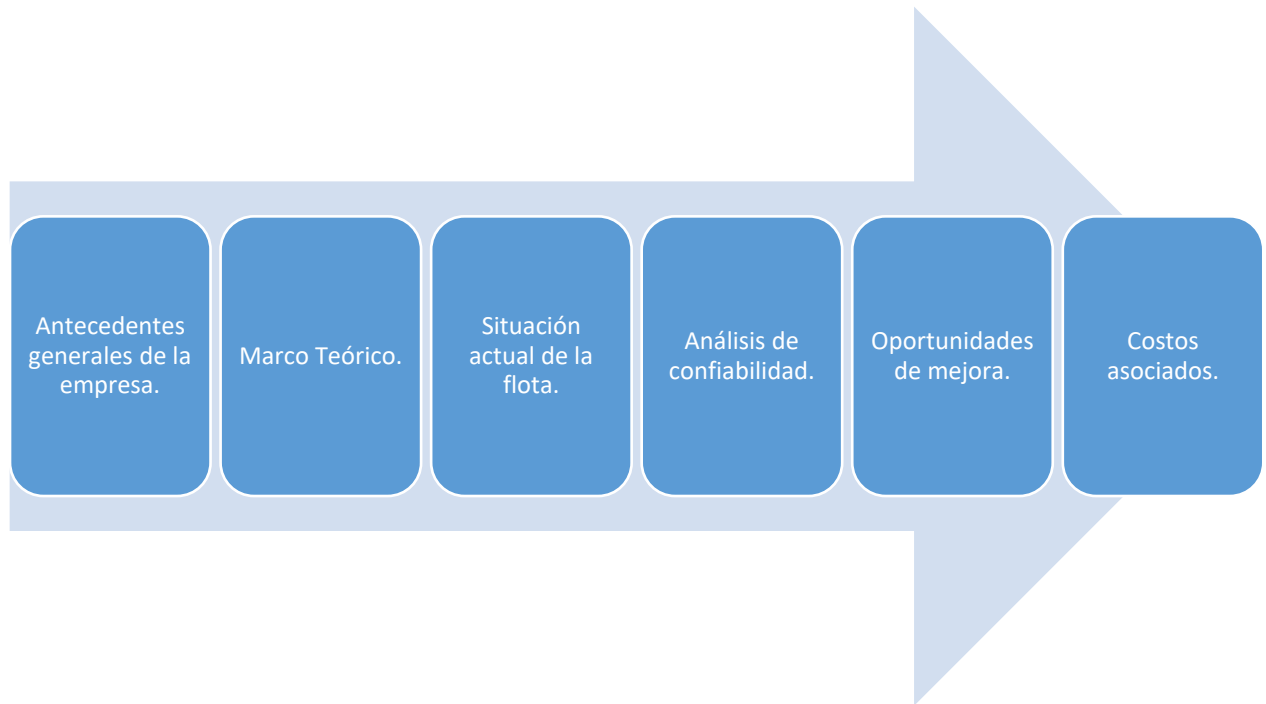


Ilustración 1: Plan de trabajo. (Fuente propia)

La Ilustración 1 muestra el esquema que guía la realización de la mejora en la confiabilidad y planes de mantenimiento de los camiones MT-65.

- Etapa 1: Antecedentes generales de la empresa.

Esta etapa consta de dar a conocer aspectos relevantes de la empresa en la que se está realizando la investigación, tales como: tamaño de producción, historia, nivel de ventas, situación actual de la empresa.

- Etapa 2: Marco teórico.

Definición de Mantenimiento, de sus políticas más usadas en la actualidad, también adentrar en la teoría de la confiabilidad, con sus principales indicadores y sus cálculos, describir la utilización de los diagramas de dispersión para encontrar los componentes que afectan la disponibilidad y confiabilidad de los equipos y el MAFEC para encontrar mejoras a los componentes críticos.

- Etapa 3: Situación actual de la flota.

Descripción general de la flota, en las cuales se enfatizará en las características de los camiones, cantidad, tipo de mantenimiento y frecuencias, taxonomía del equipo, índices de confiabilidad que tuvieron los equipos en el 2018.

- Etapa 4: Análisis de confiabilidad.

Se realizará un análisis de confiabilidad por medio de la distribución weibull a los equipos de la flota que obtuvieron un menor índice de disponibilidad el 2018, donde se graficará y analizarán la probabilidad de falla, confiabilidad y la tasa de falla con la data obtenida del ERP Máximo, para luego buscar con los diagramas de Jack – Knife los componentes críticos que afectan de forma significativa la disponibilidad de los equipos en cuestión.

- Etapa 5: Oportunidad de mejora.

Una vez encontrado los componentes críticos, se realizará un MAFEC a cada uno para así buscar mejoras y jerarquizar según criticidad de los modos de falla, implementar tareas a las pautas de mantenimiento actuales y aumentar los índices de confiabilidad.

- Etapa 6: Costos asociados.

Se indicarán los costos asociados a cada mejora y tarea implementada en las pautas de mantenimiento, realizando una comparación de los costos para dejar en claro la mejor alternativa.

1. Antecedentes generales de la empresa.

Con el fin de dar a conocer en qué empresa se está desarrollando la investigación, se describirán aspectos, tales como: una breve reseña de la empresa, ubicación, producción y principales clientes.

1.1 Breve reseña de la empresa

La empresa minera donde se realizó el presente informe, fue fundada en el año 1989. Es una empresa minera que opera en el norte de Chile, en la III región de Atacama. Su proceso productivo está orientado a la producción de cobre, tanto en concentrado como en cátodos. Está compuesta por 3 minas subterráneas; las cuales abastecen a las plantas de dicha minera con minerales sulfurados de cobre y minerales oxidados, para transformarlos en su producto final de concentrados de cobre y cátodos respectivamente.

Actualmente se están desarrollando dos proyectos para la explotación de cobre, ambos yacimientos son de mediana minería y se ubican en la región de Coquimbo y la de Antofagasta.

1.2 Ubicación

Las operaciones de la minera nortina se realizan en la III región de Atacama. Las oficinas generales están localizadas en la ciudad de Copiapó, distante 805 Km. al norte de Santiago.

Las tres minas subterráneas de la empresa se encuentran ubicadas alrededor de 20 Km. de distancia de las oficinas generales.

Dos de las tres minas de la empresa se localizan aproximadamente a 5 Km. de una de sus plantas y la tercera mina se encuentra adyacente a esta.

A 13 Km. de Copiapó, por el camino internacional hacia Argentina, se ubican las dependencias de la otra planta.

Además la empresa consta de oficinas administrativas en la ciudad de Santiago, las cuales están ubicadas en la comuna de Las Condes.

1.3 Producción.

De acuerdo a la comisión chilena del cobre (Comision Chilena del Cobre, 2014), la empresa nortina está catalogada como mediana minería.

Entre las 3 minas activas de dicha sociedad, se extraen sulfuros, óxidos y estéril, cuya extracción mensual del 2018 se resume como muestra la Tabla 1:

	Mina 1			Mina 2		Mina 3	
	Óxidos	Sulfuros	Estéril	Sulfuros	Estéril	Sulfuros	Estéril
Enero	56.613	183.518	24.474	40.445	13.261	18.703	13.027
Febrero	49.191	142.718	14.696	54.900	8.062	41.047	7.617
Marzo	44.461	170.047	13.775	76.045	10.567	39.883	2.172
Abril	45.416	214.327	18.407	49.785	7.649	56.611	4.726
Mayo	61.110	209.665	40.063	77.980	11.572	42.938	2.170
Junio	57.663	216.839	20.171	76.858	11.277	36.391	0
Julio	67.489	160.330	32.784	132.206	6.902	45.813	275
Agosto	60.258	217.245	19.279	106.975	9.675	22.608	0
Septiembre	66.595	204.256	28.971	92.758	14.040	20.762	0
Octubre	65.536	247.839	27.360	77.850	26.374	35.516	0
Noviembre	60.830	259.044	42.539	73.285	20.875	26.694	0
Diciembre	33.770	93.295	19.830	22.099	14.397	15.138	0

Tabla 1: Extracción (TON) mensual del año 2018 en las minas.

1.4 Principales Clientes.

De la extracción, los sulfuros y los óxidos son trasladados a las plantas, para ser transformados en concentrados de cobre y cátodos de cobre respectivamente. Estos productos son comercializados por la empresa tanto dentro como fuera del país, realizando ventas a nivel nacional a la Empresa Nacional de Minería (ENAMI), la que compra el concentrado generado y los cátodos de cobre son exportados principalmente a Europa y América del Norte, específicamente a Italia y Estados Unidos respectivamente.

2. Marco Teórico.

La finalidad de este capítulo es la inserción a la teoría en la que se basaran los cálculos, procedimientos y mejoras que se realizaran en el trabajo, para poder entender de mejor manera como se pensó cada paso para llegar a las conclusiones.

2.1 Mantenimiento.

El mantenimiento tiene como definición:

“Conjunto de operaciones y cuidados necesarios para que instalaciones, edificios, industrias, etc., puedan seguir funcionando adecuadamente.” (RAE, 2019)

“Todas las actividades involucradas en conseguir que los equipos del sistema productivo estén en buen estado de funcionamiento.” (Heizer, 2008)

Por otro lado (Torres, 2016) expone que los objetivos del mantenimiento son:

- Máxima disponibilidad:
 - Asegurar máxima disponibilidad y fiabilidad de los sistemas, instalaciones, máquinas y equipos.
 - Reparar las averías en el menor tiempo posible
- Mínimo costo:
 - Reducir los mantenimientos correctivos.
 - Manejo óptimo del stock.
 - Manejarse dentro de costos anuales regulares.
- Conservación de los activos físicos (máquinas, equipos y sistemas):
 - Realizar las reparaciones en las máquinas, equipos e instalaciones, pensando en mantener la vida útil de los mismos.
 - Tener presente al realizar la programación de los mantenimientos, la fiabilidad de los activos.
- Conservación de la energía:
 - Conservar en buen estado las instalaciones auxiliares.
 - Eliminar paros y puestas en marchas continuos.
 - Controlar el rendimiento de los equipos.
- Conservación del medio ambiente:
 - Mantener las protecciones en aquellos equipos que pueden producir fugas contaminantes.
 - Evitar averías en equipos e instalaciones correctoras de poluciones.

- Higiene y seguridad:
 - Mantener las protecciones de seguridad en los equipos para evitar accidentes.
 - Adiestrar al personal sobre normas para evitar los accidentes.
 - Asegurar que los equipos funcionen en forma adecuada.

Para poder ejecutar un correcto mantenimiento y por ende poder cumplir con los objetivos recién enumerados, existen diversas políticas que se implementan según requerimientos y condiciones.

2.2 Políticas de Mantenimiento.

A medida que el mantenimiento se ha desarrollado en el tiempo, se han incorporado diversas políticas, las cuales se describen a continuación:

2.2.1 Mantenimiento Correctivo.

Política del mantenimiento que según diversos autores tiene como definición:

“que se aplica luego de aparecer un fallo. Ello no implica que la reacción esté debidamente planeada” (Pascual, 2007)

“es que las reparaciones adecuadas y completas de todos los problemas incipientes se realizan según sea necesario”. (Mobley R. K., 2002)

De las definiciones anteriores, el mantenimiento correctivo advierte la sustitución del elemento por falla y se divide en 2 tipos:

- No planificada: Es el mantenimiento de emergencia (reparación de roturas). Debe efectuarse con urgencia, ya sea por una avería imprevista a reparar lo más pronto posible o por una condición imperativa que hay que satisfacer (problemas de seguridad, de contaminación, de aplicación de normas legales, etc.) (Arata Andreani, 2009)
- Planificado: Es aquel que se sabe con antelación qué es lo que debe hacerse, de modo que cuando se detenga el equipo para efectuar la reaparición, se disponga del personal, repuestos y documentos técnicos necesarios para realizarla correctamente (Arata Andreani, 2009).

El mantenimiento correctivo se realiza una vez haya fallado el elemento y no antes de eso.

2.2.2 Mantenimiento Preventivo.

La siguiente política de mantenimiento da la oportunidad de prevenir la falla insipiente. El mantenimiento preventivo es aquel que: “Consiste en reparar un ítem o reemplazar sus componentes en forma periódica, sin importar su estado de condición al iniciar su intervención, y bajo la hipótesis de que el patrón de fallas que rige su comportamiento tiene un periodo de vida útil conocido, alcanzando los mismos niveles de confiabilidad y calidad originales”. (Pistarelli, 2010)

Otra definición de esta política de mantenimiento es: “el cuidado y el servicio por parte del personal de mantenimiento para mantener las instalaciones en un estado operativo satisfactorio al proporcionar la detección sistemática, inspección y corrección de fallas incipientes, ya sean antes de su desarrollo en fallas mayores o antes de que ocurran”. (Dhillon, 2017)

El mantenimiento preventivo busca mantener a los equipos y elementos de estos operando antes de que fallen, ya sea inspeccionando o cambiando las partes antes de que termine su vida útil. Existen 7 elementos que describen a esta política de mantenimiento:

- Determinar su capacidad de servicio mediante la comparación de sus características mecánicas, eléctricas, físicas y de otro tipo con los estándares establecidos. (Dhillon, 2017)
- Ajuste: Se ocupa de realizar ajustes periódicos a los elementos variables establecidos para lograr un rendimiento óptimo. (Dhillon, 2017)
- Alineación: Se ocupa de realizar cambios en los elementos variables establecidos de un elemento para lograr el rendimiento óptimo. (Dhillon, 2017)
- Calibración: Se ocupa de detectar y ajustar cualquier discrepancia en la posición del parámetro o el material que se compara con el valor estándar establecido. (Dhillon, 2017)
- Servicio: Se ocupa de cargar, limpiar, lubricar, etc., periódicamente, elementos / materiales para prevenir la aparición de fallas incipientes. (Dhillon, 2017)
- Pruebas: Se ocupa de pruebas periódicas para determinar la capacidad de servicio y detectar la degradación eléctrica o mecánica. (Dhillon, 2017)(p.58)
- Instalación: Se ocupa de reemplazar periódicamente los artículos de vida limitada o los artículos que experimentan un ciclo de tiempo o degradación del desgaste, para mantener el nivel de tolerancia establecido. (Dhillon, 2017)

2.2.3 Mantenimiento Predictivo.

“Es un tipo de mantenimiento que requiere del uso de sensores y herramientas que permitan la identificación de cualquier indicador de falla antes de que este ocurra, con la finalidad de poder tener el tiempo suficiente para una planificación de la reparación del equipo.” (Salamanca, 2018)

Esta política se define como: “El uso de enfoques modernos de medición y procesamiento de señales para diagnosticar con precisión la condición del equipo/elemento durante la operación”. (Dhillon, 2017)

En esta misma línea, (Salamanca, 2018) indica las principales características de esta política:

- Es un tipo de tarea que persigue conocer permanentemente el estado de la máquina mediante parámetros físicos medibles.
- Para aplicar este método es necesario identificar correctamente las variables que son sensibles ante la aparición de un problema
- Requiere de inversión tecnológica a través de herramientas para poder ser llevado a cabo.

2.2.4 Mantenimiento Proactivo.

Esta política de mantenimiento (Campbell, 2016), la define como: “Trabajo que se realiza con intención de evitar las consecuencias de los fracasos. Esto incluye trabajo preventivo, predictivo y de detección (búsqueda de fallas).

Consiste en monitorear las propiedades de ciertos parámetros en los componentes antes de decidir una intervención. Se pretende determinar la causa “más” raíz que puede provocar una falla sintomática con el fin de desviar una tendencia indeseable. (Pistarelli, 2010)

Por otro lado (Dhillon, 2017) nos entrega 4 elementos que debe tener un mantenimiento de este tipo:

- Optimización y adaptación de métodos y tecnologías de mantenimiento para cada aplicación.
- Practicando un proceso continuo de mejoramiento.
- Uso de comentarios y comunicaciones para garantizar que los cambios en el diseño / procedimientos estén disponibles de manera eficiente para los diseñadores.

- Asegurando que nada que afecte el mantenimiento ocurra en total aislamiento, con el objetivo final de corregir el equipo en cuestión para siempre.

No cabe duda que esta estrategia une lo preventivo, correctivo y predictivo para estar continuamente buscando las mejoras.

2.3 Confiabilidad.

La definición de confiabilidad o fiabilidad es: “el conjunto de teorías y métodos matemáticos que se traducen en procedimientos organizacionales orientados a la solución de problemas de previsión, estimación, optimización de las probabilidades de supervivencia, vida media, porcentaje de tiempo de buen funcionamiento de un sistema”. (Arata, 2005)

La importancia de difundir los criterios de confiabilidad se describen a continuación:

- El aumento de la complejidad de los productos que, si no se cuentan con procedimientos pertinentes, incrementan la probabilidad de las fallas.
- Las dificultades de mantención de ciertas maquinas o estructuras.
- La exigencia de aumentar la duración del funcionamiento correcto de un producto.
- La necesidad de reducir los pesos sin afectar la seguridad del funcionamiento. Ello requiere una proyección más cuidadosa, con un mayor conocimiento del historial de carga, de las propiedades de resistencia de los materiales y del estado tensional actual.
- El cambio de visión con respecto a la responsabilidad civil vinculada a la producción de un producto. (Arata, 2005)

2.3.1 Relación entre fiabilidad y probabilidad de falla.

“Para crear un modelo matemático para la probabilidad de fallo, consideramos el funcionamiento de un determinado elemento en el medio para él especificado. Definimos la variable aleatoria como el tiempo durante el que el elemento funciona satisfactoriamente antes de que se produzca un fallo. La probabilidad de que el elemento proporcione unos resultados satisfactorios en el momento t se puede definir como “fiabilidad”. La designamos $R(t)$ ”, es así como (Torres, 2016) define el cálculo de la fiabilidad.

La función opuesta a $R(t)$ es denominada probabilidad de falla $F(t)$, es decir, la probabilidad de que ocurra un fallo antes del instante t .

$$F(t) = 1 - R(t)$$

Ecuación 1: Relación de la probabilidad de falla y la confiabilidad.

La grafica de $R(t)$, $F(t)$ en función del tiempo se muestra en la Ilustración 2:

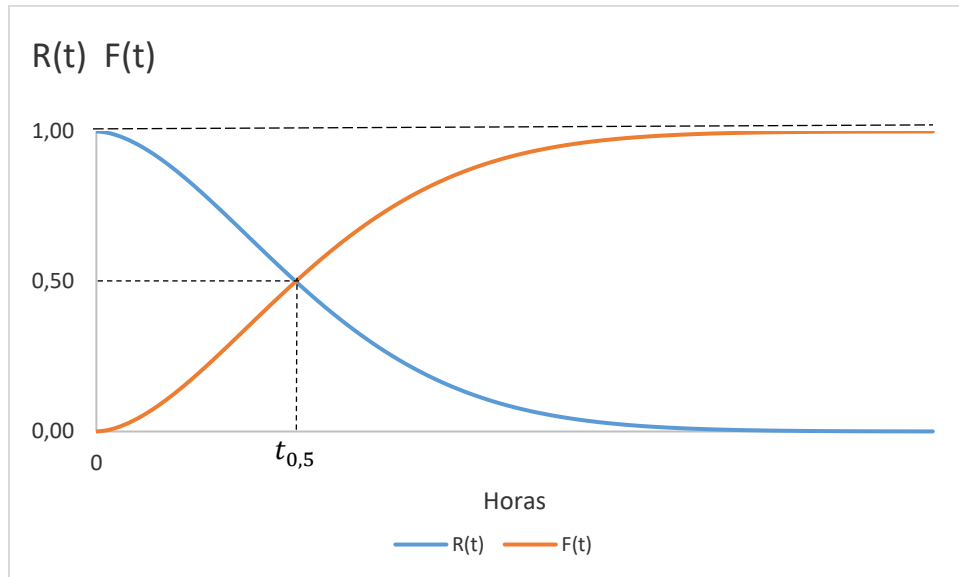


Ilustración 2: Graficas representativas de $R(t)$ y $F(t)$ en función del tiempo. (Torres, 2016)

La Ilustración 2, muestra que a medida va disminuyendo la confiabilidad, la tasa de falla aumenta proporcionalmente, cuyo intercepto se da al momento de que ambos están al 50%.

2.3.2 Tasa de Falla $\lambda(t)$

La tasa de falla se define como “aquella función $\lambda(t)$ tal que el producto de $\lambda(t)dt$ represente la probabilidad de que el elemento se estropee en el intervalo de tiempo comprendido entre t y $t+dt$, suponiendo que en el instante t esté funcionando correctamente.” (Arata, 2005)

La unidad de medida de la tasa de falla es de tiempo inverso y su interpretación puede ser como “cantidad de fallas por unidad de tiempo” (Arata, 2005)

2.3.3 Las fases de vida de la máquina.

Es una curva que representa los fallos durante el periodo de vida útil de un sistema o máquina. Se divide en tres etapas:

- Fallos iniciales: esta etapa se caracteriza por tener una elevada tasa de fallos que desciende rápidamente con el tiempo. Estos fallos pueden deberse a diferentes

razones como equipos defectuosos, instalaciones incorrectas, errores de diseño del equipo, desconocimiento del equipo por parte de los operarios o desconocimiento del procedimiento adecuado. (esacademi.com, 2020)

- Fallos normales: etapa con una tasa de errores menor y constante. Los fallos no se producen debido a causas inherentes al equipo, sino por causas aleatorias externas. Estas causas pueden ser accidentes fortuitos, mala operación, condiciones inadecuadas u otros. (esacademi.com, 2020)
- Fallos de desgaste: etapa caracterizada por una tasa de errores rápidamente creciente. Los fallos se producen por desgaste natural del equipo debido al transcurso del tiempo. (esacademi.com, 2020)

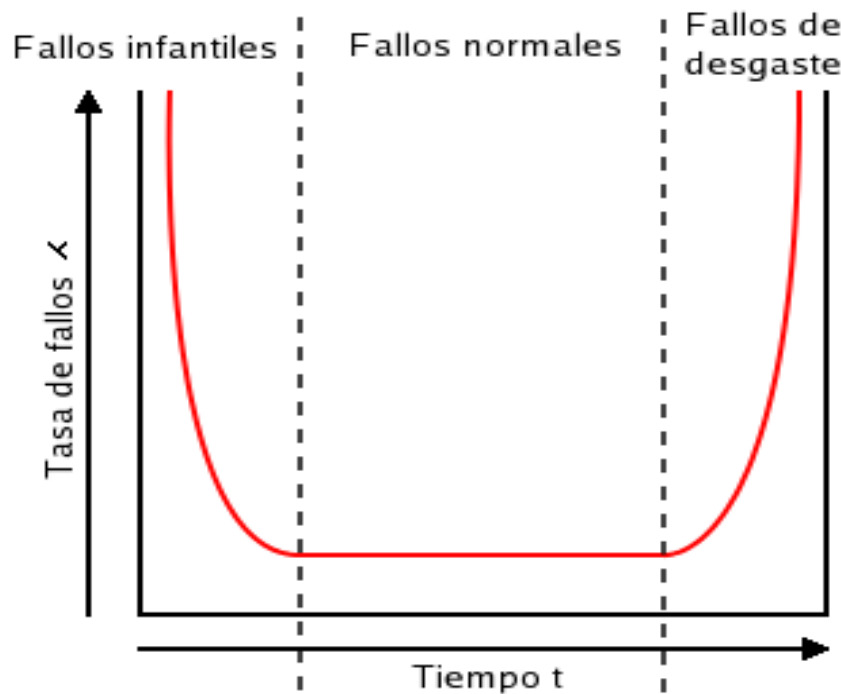


Ilustración 3: Representación de la tasa de falla en función del tiempo. (esacademi.com, 2020)

En la Ilustración 3, se representa gráficamente la curva típica de las etapas de la vida de una máquina, desde fallos infantiles hasta fallos de desgaste.

2.3.4 Distribución Weibull.

“La ley de Weibull cubre los casos en que la tasa de fallo $\lambda(t)$ es variable y permite por tanto ajustarse a los periodos de juventud y a las diferentes formas de envejecimiento.” (Torres, 2016)

La probabilidad de falla está dado por la Ecuación 2:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$$

Ecuación 2: Probabilidad de falla F(t) según Weibull

Donde α se denomina vida característica y tiene como dimensiones las mismas de t (tiempo), representa el intervalo al cabo del cual, independientemente del valor de β , el 63.21% de los componentes estaría averiado. A β se le denomina como parámetro de forma, el cual es adimensional. Este parámetro determina la variación de la tasa de fallas, que será decreciente si $\beta < 1$ y creciente si $\beta > 1$. (Arata, 2005)

De la Ecuación 1 y Ecuación 2, se tiene entonces que la relación que determina la confiabilidad para Weibull es:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$$

Ecuación 3: Forma de calcular la confiabilidad para la distribución Weibull.

La ecuación para determinar la tasa de falla utilizando Weibull queda representada en la Ecuación 4:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}$$

Ecuación 4: Forma de calcular la tasa de falla para la distribución Weibull.

Para determinar el parámetro de forma y la vida característica se tiene el método de los mínimos cuadrados, mediante la transformación doble logarítmica de la función de distribución acumulativa:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(x)}\right)\right) = \beta \ln(x) - \beta \ln(\alpha)$$

Ecuación 5: Función doble logaritmo de la distribución acumulativa.

La Ecuación 5 representa una ecuación lineal de la forma:

$$y = ax + b$$

Donde:

- $y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(x)}\right)\right)$
- $a = \beta$
- $x = \ln(x)$
- $b = -\beta \ln(\alpha)$

De la ecuación anterior se desprende que β es la pendiente de la recta y también se observa que el valor α depende del intercepto b de la recta y del parámetro de forma β , por lo tanto:

$$\alpha = e^{-b/\beta}$$

Ecuación 6: Forma de calcular la vida característica α .

La esperanza de falla (MTBF) en la distribución weibull se calcula como sigue:

$$MTBF = \gamma + \alpha \Gamma\left[\frac{\beta + 1}{\beta}\right]$$

Ecuación 7: MTBF para la distribución weibull

De la Ecuación 5, se desprende que se trata de una ecuación de la recta, la cual puedes ser obtenida desde una gráfica cuyos ejes estarán determinados por factores como $F(x)$ y x . Para poder calcular la probabilidad de falla se tiene el método de rangos promedio, el cual se describe a continuación.

2.3.5 Métodos de Rangos Promedio.

Para poder trazar la recta de regresión, se debe calcular un estimador para la función de distribución acumulativa $F(x)$. Este estimador, llamado Rangos promedios, es un estimador no paramétrico basado en el orden de las fallas. Este aspecto implica que la muestra de datos se debe organizar de menor a mayor (en forma ascendente) (Reliabilityweb.com, 2020)

La función falla acumulada puede ser obtenida utilizando el método de rangos promedio a través de la aproximación de Bernard:

$$F(t_j) = \frac{K_j - 0.3}{N_0 + 0.4}$$

Ecuación 8: Aproximación de Bernard. (Reliabilityweb.com, 2020)

Donde:

- $F(t_j)$: Probabilidad de falla acumulada al tiempo t_j
- K_j : N° de eventos que han ocurrido hasta t_j
- N_0 : N° total de eventos.

Sin embargo este método asume que solo existen paradas correctivas y no toma en cuenta las preventivas que pueden existir entre medio de las correctivas, es por esto que al existir esta situación, primero se debe ajustar el ranking de fallas para luego poder usar este método.

2.3.6 Ranking ajustado con datos censurados a la derecha.

Las maquinas pueden experimentar paradas inesperadas (correctivas) como también programadas (preventivas), por lo que es común que los datos experimentales sean una combinación de antecedentes tanto correctivos como preventivos. Esto quiere decir que se tendrán tiempos censurados a la derecha, ya que el tiempo de operación del equipo, sistema o componente fue interrumpido, por mantenimientos preventivos, sin saber cuánto tiempo más hubiese funcionado hasta la falla.

Es por dicho motivo que los eventos providenciales a la falla y su respectivo ranking, debe ser ajustado considerando el motivo de que no se sabe cuánto tiempo más hubiera funcionado hasta la falla.

Este ajuste se realiza estableciendo la posición media de estos eventos. Esto radica en ajustar el ranking de fallas, considerando las posiciones probables de los datos suspendidos y asociando la posición media a las fallas observadas.

Para realizar el cálculo recién descrito se utiliza la Ecuación 9:

$$r_j = r_{j-1} + \frac{N + 1 - r_{j-1}}{N + 1 - (k_j - 1)}$$

Ecuación 9: Calculo del ranking ajustado con datos censurados a la derecha.

Donde:

- r_j : Posición Media de la falla j
- k_j : Ranking Global de eventos.
- N : Número de eventos totales (Correctivos y Preventivos)

2.3.7 Disponibilidad.

Un equipo operando sin duda alguna en un momento dado fallará, lo que significa que dejara de producir y estará un tiempo siendo reparado. La definición de disponibilidad habla sobre una relación matemática para calcular que porcentaje del tiempo estará operativo un determinado elemento u equipo y según (Tinga, 2013) la definición de disponibilidad es: “la probabilidad de que el sistema esté listo para realizar su función especificada, en su entorno operativo especificado y previsto, cuando se solicite en un punto aleatorio en el tiempo o durante un periodo de tiempo establecido”.

Como fue señalado anteriormente la disponibilidad habla de una relación matemática, la que se describe a continuación:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Ecuación 10: Disponibilidad

Donde:

- A: Disponibilidad.
- MTBF: Tiempo medio entre fallas.
- MTTR: Tiempo medio de reparación.

Es de suma importancia aclarar que el indicador MTTR es parte de la mantenibilidad¹ y no de la confiabilidad. Para el cálculo de este se tiene:

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de inactividad}}{N^{\circ} \text{ de averías}}$$

Ecuación 11: Calculo del MTTR.

Y para calcular el MTBF, se tiene:

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo total de buen funcionamiento}}{N^{\circ} \text{ de averías}}$$

Ecuación 12: Calculo de MTBF

Cabe destacar que el indicador de disponibilidad tiene otras formas de calcular, es por este motivo que (Arata Andreani, 2009), habla de la Ecuación 10: “este indicador de disponibilidad está presente, sólo, el efecto de la falla del elemento”.

Es decir, este indicador en especial, solo toma los tiempos de reparación por mantenimiento correctivo. El cual se mueve entre valores del 0 al 1, y dependiendo de las necesidades de cada empresa es el rango de buena disponibilidad y cual no.

¹Mantenibilidad: Facilidad del desarrollo de una intervención de mantención o reparación, medida sobre la base de los tiempos de detención de equipo. (Arata, 2005)

2.4 Diagrama de dispersión.

Un método en el que se mezcla la información de los tiempos de paradas y la frecuencia de fallas es el diagrama de dispersión o Jack-knife, el cual sirve para detectar imprevistos en los que son necesarios buscar mejoras para que impacten menos en los indicadores de los equipos, por lo que (Knights, 2001), describe este tipo de diagrama como: “los diagramas de dispersión de registros conservan el contenido de información básica de un histograma de Pareto, pero permiten la identificación de los factores dominantes que influyen en las fallas, a saber, la frecuencia de fallas y el tiempo de inactividad o costo promedio. Al aplicar valores límite, los diagramas de dispersión de registros se pueden dividir en cuatro cuadrantes para clasificar las fallas de acuerdo con características agudas o crónicas. Esta clasificación facilita el análisis de fallas de causa raíz y permite la identificación de fallas crónicas a menudo asociadas con costos de producción perdidos ocultas considerables. Al intercambiar datos de fallas en períodos de tiempo sucesivos, los diagramas de dispersión de registros proporcionan un medio gráfico útil para analizar el rendimiento de las iniciativas de mejora de mantenimiento.”

Al realizar un Jack – knife, habrán dos ejes; el de las abscisas con las frecuencias de fallas (n) y el de las ordenadas con los tiempos de reparación (MTTR). Los elementos en estudio estarán dispersos entre cuatro cuadrantes los cuales son determinados por dos rectas que se cruzan perpendicularmente: Límite MTTR (agudas) y el límite n (crónicas), el cálculo de cada uno se detalla como sigue:

$$\text{Límite MTTR} = D/N$$

Ecuación 13: Límite MTTR (Knights, 2001).

- D: Tiempo total fuera de servicio.
- N: Número total de fallas.

$$\text{Límite } n = N/Q$$

Ecuación 14: Límite n (Knights, 2001).

- Q: Número de códigos de falla.

El gráfico de Jack – Knife queda como se muestra en la Ilustración 4, donde por encima del límite MTTR se encuentran los problemas crónicos o de mantenibilidad y al lado derecho del límite n están los con problemas agudos o de confiabilidad. Además se agrega una curva de indisponibilidad, la que se construye mediante el promedio de la indisponibilidad dividida por la frecuencia más baja y así encontrar su punto más alto y para su punto más bajo de la misma indisponibilidad promedio dividida por la frecuencia más alta.

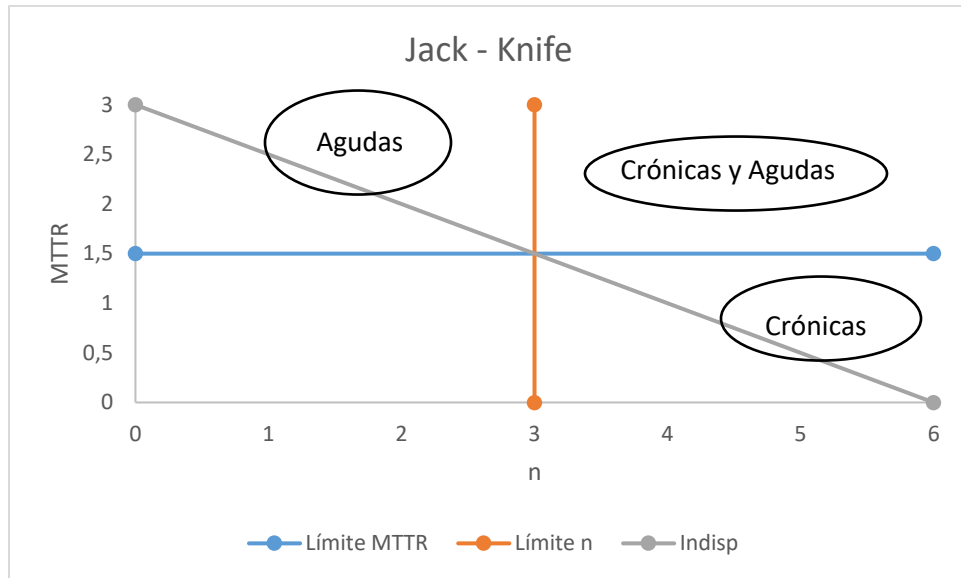


Ilustración 4: Ejemplo de formato de un gráfico Jack – Knife. (Knights, 2001)

2.5 Metodología de Análisis de Fallas sus Efectos y Criticidad.

Es un proceso simple y sistemático, utilizado para investigar, rectificar y eliminar fallas de los equipos, especialmente orientado aquellas fallas de tipo crónica y repetitiva. (Arata, 2005)

El MAFEC (Metodología de Análisis de Fallas sus Efectos y Criticidad) se trata de una análisis de modos y efectos de falla que incluye la criticidad y análisis de causa raíz de los mismos. Esta técnica se utiliza ampliamente en la industria pues permite identificar y eliminar cualquier fuente de riesgo en los procesos. (Salamanca, 2018)

Los pasos para poder realizar correctamente un MAFEC son:

I.- Funciones: Se comienza por responder la pregunta ¿Cuáles son las funciones deseadas y los estándares de desempeño asociados del activo en su contexto operacional presente (funciones)? (JA1012, 2002)

II.- Fallas Funcionales: Se responde a la pregunta ¿De qué maneras puede fallar al cumplir sus funciones (fallas funcionales)? (JA1012, 2002)

III- Modos de Falla: Responde a la pregunta ¿Qué causa cada falla funcional (modos de falla)? (JA1012, 2002)

IV.- Efectos de Falla: Se debe responder a la pregunta ¿Qué pasa cuando ocurre cada falla funcional (efectos de falla)? (JA1012, 2002)

V.- Categorías de Consecuencias: Las consecuencias de cada modo de falla deben ser formalmente categorizadas. (JA1012, 2002)

- Falla evidente: es aquella mediante la cual los efectos del modo de falla aislado se vuelve apreciable para el equipo de operadores en circunstancias normales. (JA1012, 2002)
- Falla oculta: Las fallas ocultas se pueden identificar al hacerse la siguiente pregunta: ¿Algunos de los efectos de este modo de falla se harán evidentes para el equipo de operadores en circunstancias normales si el modo de falla ocurre aislado? Si la respuesta a esta pregunta es no, el modo de falla es oculto. (JA1012, 2002)
- Consecuencias en la Seguridad: Una falla tiene consecuencias en la seguridad si existe una probabilidad intolerable de que pueda matar o dañar a un ser humano. (JA1012, 2002)
- Consecuencias Ambientales: A otro nivel, “seguridad” se refiere a la seguridad o el bienestar de la sociedad en general. Tales fallas tienden a ser clasificadas como aspectos “ambientales”. (JA1012, 2002)
- Consecuencias Operacionales: Las fallas que afectan las funciones primarias de estos activos afectan la capacidad de ingresos de réditos de la organización. (JA1012, 2002)
- Consecuencias No Operacionales: Las consecuencias de una falla evidente que no tiene efectos adversos directos en la seguridad, el ambiente o la capacidad operacional. (JA1012, 2002)

VI.- Índice de severidad: Clasifica la gravedad de los efectos de falla. Tiene una escala del 1 – 10, donde 1 corresponde a una severidad baja y 10 a una severidad alta. (Ver Tabla 37 Anexo D)

- Índice de severidad individual: Asociado a cada uno de los efectos de falla
- Índice de severidad total: Corresponde al mayor índice de severidad individual, por cada modo potencial de falla

VII.- Índice de ocurrencia: Clasifica la frecuencia de aparición de la causa. Al igual que el índice de severidad, es evaluado en una escala de 1 a 10, siendo 1 ocurrencia baja y 10 ocurrencia alta (ver Tabla 38 Anexo D)

VIII.- Índice de detectabilidad: Es la capacidad que los controles existentes identifiquen una deficiencia potencial del proceso. Se evalúa en una escala de 1 a 10, donde 1 es la detectabilidad alta y 10 una detectabilidad baja. (Ver Tabla 39 Anexo D)

IX.- Número de prioridad de riesgo (RPN): Corresponde a un parámetro que permite establecer el orden de prioridad, el cual es un producto de los índices de severidad total (S), ocurrencia (O) y detectabilidad (D)

$$RPN_i = S_i \cdot O_i \cdot D_i$$

Ecuación 15: Número de prioridad de riesgo.

3. Situación actual de la flota

La empresa de minas subterráneas en la actualidad dispone de una flota de 20 camiones de transporte marca Epiroc modelo MT-65, los cuales son destinados según las necesidades requeridas entre las 3 minas existentes. La abreviatura con los que se designa cada camión es: CAM + MT + 65 + N° camión.

3.1 Especificaciones técnicas.

Conocer las características técnicas de estos camiones (Ilustración 5) es fundamental para entender qué tipo de activo se está estudiando, tener claro el dimensionamiento, capacidad, velocidades alcanzadas y el tipo de motor ayudará a comprender de mejor forma sus reales capacidades de trabajo.



Ilustración 5: Camión MT-65. (Fuente propia)

3.1.1 Capacidad y dimensiones.

Los camiones Epiroc MT-65, están diseñados para transportar un máximo de 65 toneladas de material, su tolva tiene un volumen de capacidad de 29.6 m³, teniendo un peso de 46.300 Kg, sin carga. Estos equipos fueron creados pensando en la minería subterránea, teniendo dimensiones acorde a las funciones requeridas por este tipo de minería:

- Altura, con tolva descendida: 3.47 metros
- Altura, con tolva elevada: 7.04 metros
- Ancho: 3.50 metros
- Largo: 11.43 metros
- Neumáticos: 35/65 x 33R

3.1.2 Motor y velocidades

El motor diésel que tiene el MT-65 es marca CUMMINS con una potencia de 760 HP a 2.100 rpm, su torque máximo es 2.981 Nm a 1.500 rpm. Su estanque de combustible tiene una capacidad de 844 litros.

La transmisión automática es de 6 velocidades de avance y 2 de retroceso con convertidor integral de una etapa con bloque automático. Las velocidades de avance que alcanza cada marcha, va a depender si el camión esta descargado o no y se describen en la Tabla 2:

	Descargado [Km/h]	Cargado [Km/h]
1ª Marcha	6,2	6,2
2ª Marcha	9,2	9,2
3ª Marcha	12,2	12,1
4ª Marcha	18,2	18,0
5ª Marcha	24,5	24,1
6ª Marcha	36,3	35,4

Tabla 2: Velocidades alcanzadas por cada marcha. (Fuente propia)

3.2 Estructura técnica del MT-65.

Para realizar un correcto análisis y buscar mejoras oportunas, se debe saber cómo está compuesto el equipo, es decir, saber cuáles son los componentes, sub-sistemas y sistemas que se ven afectados por la falla, ya que de esta forma se puede indagar en las causas que proporcionaron dicha falla y así encontrar la forma de minimizar o eliminar

de raíz el imprevisto. Un método de poder tener claro cómo está compuesto el equipo, es por medio de la taxonomía del mismo, lo cual se presenta a continuación, a través de la Tabla 3 para resumir los sistemas y la Ilustración 6, la que representa gráficamente como se desarticulan los sistemas en sus sub-sistemas.

3.2.1 Sistemas.

Los sistemas que componen al camión MT-65 se enumeran en la Tabla 3 :

ITEM	SISTEMA
1	Motor
2	Tren de Potencia
3	Hidráulico
4	Eléctrico
5	Chasis
6	Cabina
7	Engrase Centralizado

Tabla 3: Sistemas que componen al camión MT-65

Cada uno de los sistemas expuestos en la Tabla 3, se descompone en sub-sistemas, los cuales son mostrados en la Ilustración 6, la cual es su primera fila se distribuyen los sistemas del camión y por debajo de cada sistema, sus respectivos sub-sistemas.

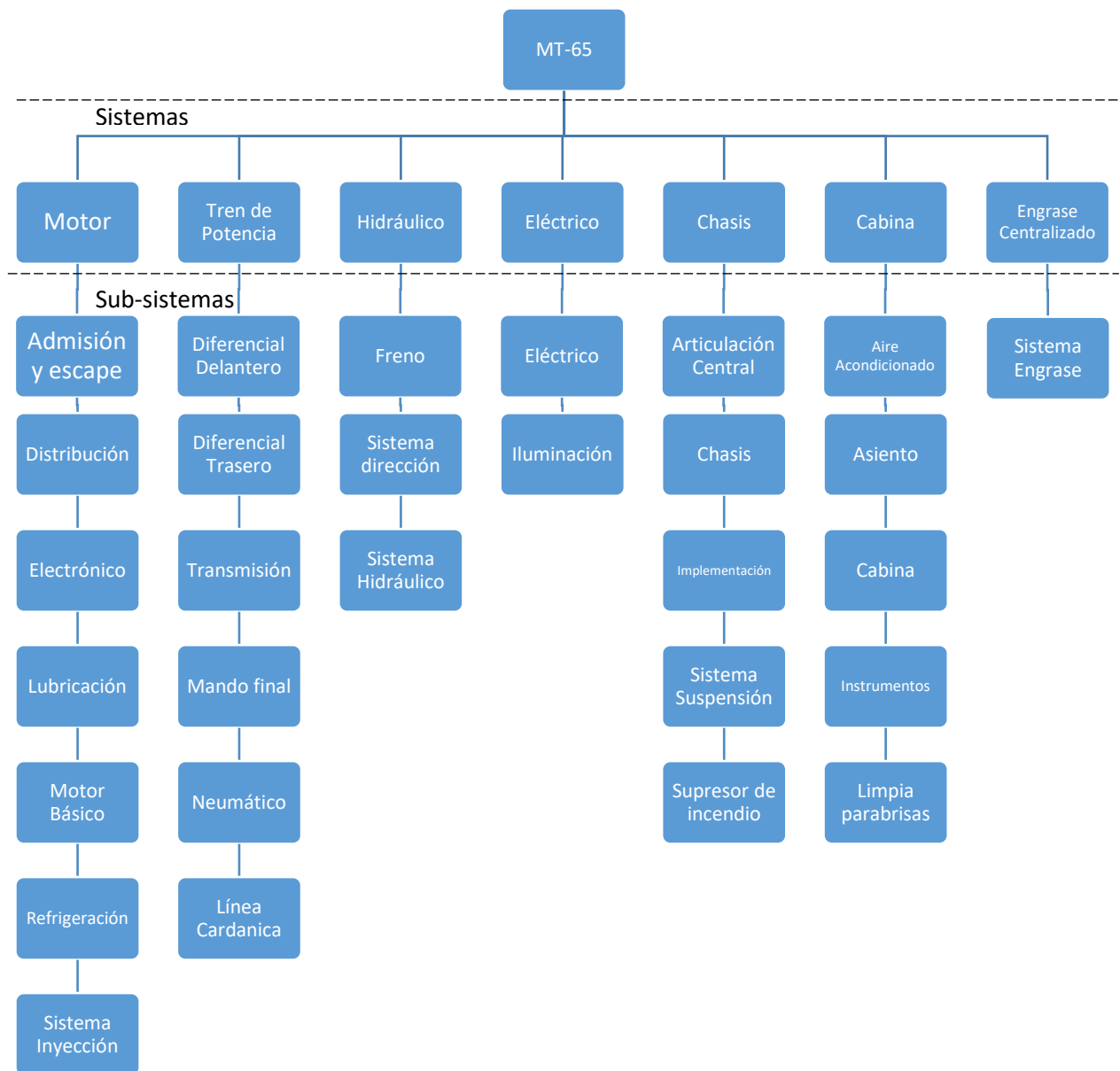


Ilustración 6: Gráfico de la taxonomía del camión MT-65

Para poder apreciar el desglose de la maquina desde los sistemas hasta sus componentes ver Tabla 24 Anexo A.

3.3 Mantenimiento Preventivo.

Los camiones entran a mantenimiento programado cada 250 horas, teniendo un rango de error en los horómetros de entrada de $\pm 5\%$ (± 12.5 horas). Dichos mantenimientos deben cumplir con una pauta creada por los programadores del área de mantenimiento, las cuales están basadas en las recomendaciones del fabricante y del historial de fallas que han tenido dentro de la empresa. Existen 4 tipos de pautas:

- Pauta de 250 horas: Está basada netamente en el motor y sus elementos filtrantes y lubricantes. Se realiza cambios de filtros de aceite motor, filtro de aire primario y cambio de aceite motor, además de la toma de muestra de este para su análisis. En conjunto a esto, se le acompaña de inspección visual de los demás sistemas que componen al equipo, revisión de la presión y aspecto de los neumáticos, engrase general y pruebas de funcionamiento.
- Pauta de 500 horas: Esta pauta está integrada por las mismas tareas de la pauta de 250 horas, agregando además el cambio el filtro de aceite del sistema hidráulico, el cual está compuesto además por el sistema de dirección y el cambio de los filtros de aceite de transmisión. En cuanto a las revisiones visuales se integra los mandos finales, en los cuales se inspecciona el tapón magnético de cada mando final y el nivel de aceite de este.
- Pauta de 1000 horas: Está compuesta por las tareas de la pauta de 500 horas, agregando el sistema del aire acondicionado, en cual se cambia la correa del compresor. Al motor se le cambia la correa del alternador y el respiradero del estanque de combustible. Se realiza cambio de aceite de los diferenciales (delantero y trasero) y el respiradero. En los mandos finales también se le realiza cambio de aceite. A los frenos se le realiza el cambio de aceite de refrigeración. En el sistema hidráulico se realiza cambio de aceite. Para los pernos en general del equipo se les realiza un ajuste de su apriete (torque según especificaciones del fabricante)
- Pauta de 2000 horas: En esta última pauta, se agrega la revisión del arnés de los diferentes sistemas (sistema eléctrico que pasan además los sensores) y el cambio de refrigerante motor.

3.4 Metodología.

Para poder mejorar los índices de confiabilidad y las pautas de mantenimiento de los camiones MT-65 de la empresa minera, lo primero será exponer el promedio anual de los índices de confiabilidad y mantenibilidad, tales como MTBF, MTTR y disponibilidad. Con estos datos, se podrá discriminar los equipos críticos de la flota, los cuales tendrán básicamente baja disponibilidad y alto índice MTTR, ya que lo primero que se busca es que todos los equipos de la flota cumplan con el requerimiento de la empresa de tener un mínimo del 70% de disponibilidad y además el tener el MTTR alto, significa un alto tiempo del equipo fuera de servicio.

El siguiente paso será el de realizar un análisis de confiabilidad por medio de la distribución Weibull, utilizando en primera instancia solo dos parámetros de Weibull (α y β) y en su efecto, si la correlación no es buena se procederá a usar el tercer parámetro (γ), con lo cual se podrá graficar la probabilidad de falla y confiabilidad, además de la tasa de falla de cada camión crítico, y así poder observar que tan baja confiabilidad tienen.

Es necesario saber que componentes están afectando la baja disponibilidad y confiabilidad de estos equipos en estudio, es por esto que es primordial el saber la taxonomía del equipo, ya que se realizarán diagramas de Jack – knife para cada sistema, sub-sistema y componente que afectan a ambos índices estudiados, siendo estos los que se encuentran a la derecha del límite n y por encima de la iso-indisponibilidad de dichos diagramas.

Finalmente con ayuda de MAFEC, se buscaran los modos de fallas críticos y mejoras para minimizar los modos de falla que le pueden ocurrir a los componentes determinados en el diagrama de Jack – knife y con eso poder mejorar las pautas de mantenimiento actuales que se usan.

Se terminará presentando los costos asociados a cada mejora propuesta y comparando dichos costos con los actuales de las pautas de mantenimiento.

3.5 Índices.

El cálculo de los índices de confiabilidad y mantenibilidad para el año 2018, fueron calculados solo para los primeros 17 camiones, ya que los números 18, 19 y 20 debido a su fecha de ingreso a faena no permiten la obtención de índices representativos (ingresaron 29/11/18, 22/12/18 y 4/1/19 respectivamente). Cabe destacar que estos índices son calculados con datos entregados por ERP Máximo (software utilizado en el empresa), cuya base de datos viene apoyada de las ordenes de trabajo que son rellenas diariamente por el personal técnico y agregados al sistemas por los administrativos del área. Los datos expuestos para cada camión durante el 2018 son

solo un promedio de los que obtuvieron mensualmente, ya que la empresa no trabaja con la variabilidad de los datos recaudados.

- Para el MTTR se tiene:

Camión	MTTR [Horas]
CAMMT65001	37,8
CAMMT65002	14,8
CAMMT65003	13,8
CAMMT65004	47,2
CAMMT65005	22,0
CAMMT65006	23,4
CAMMT65007	16,6
CAMMT65008	19,2
CAMMT65009	12,5
CAMMT65010	15,1
CAMMT65011	19,8
CAMMT65012	14,3
CAMMT65013	14,5
CAMMT65014	13,0
CAMMT65015	66,5
CAMMT65016	17,5
CAMMT65017	9,5

Tabla 4: MTTR del 2018 para los camiones desde el número 1 al 17 (Fuente propia)

La Tabla 4, muestra el promedio obtenido del tiempo medio de reparación (MTTR) de cada camión, con los datos recopilados y entregados por Máximo (ERP) durante el 2018, índice calculado por medio de la Ecuación 11, los cuales son graficados para su posterior análisis.

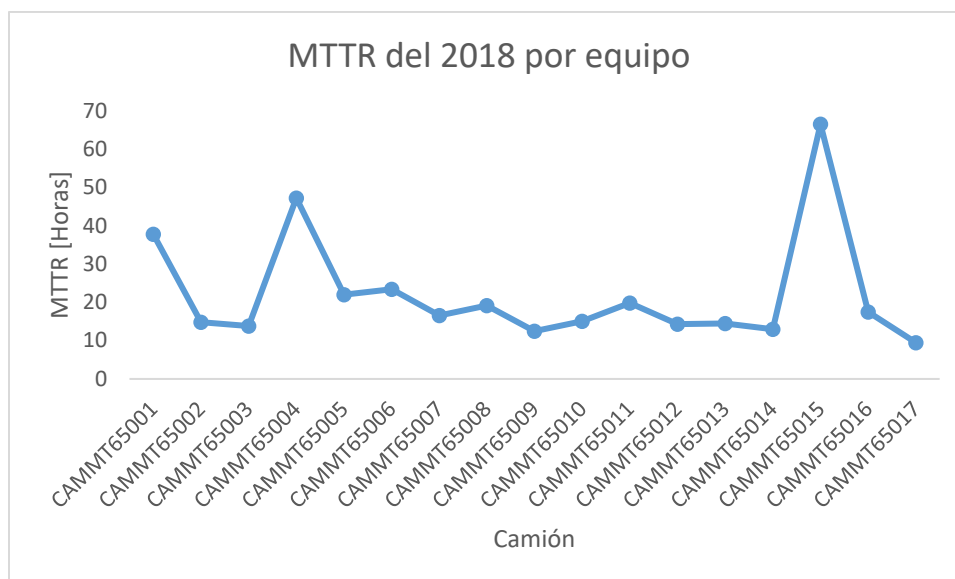


Ilustración 7: Gráfico del MTTR en función de cada camión para el 2018 (Fuente propia)

De la Ilustración 7, se puede apreciar que el camión número 15 tiene un valor del MTTR más alto que los demás, siguiéndole el camión 4 y el 1 respectivamente. Claramente se sigue una tendencia más pareja en los demás camiones.

- Para el MTBF se tiene:

Camión	MTBF [Horas]
CAMMT65001	34,6
CAMMT65002	55,8
CAMMT65003	55,2
CAMMT65004	56,9
CAMMT65005	60,5
CAMMT65006	86,6
CAMMT65007	71,1
CAMMT65008	57,2
CAMMT65009	55,1
CAMMT65010	54,4
CAMMT65011	61,8
CAMMT65012	69,2
CAMMT65013	38,7
CAMMT65014	46,7
CAMMT65015	56,2
CAMMT65016	104,5
CAMMT65017	76,6

Tabla 5: MTBF del 2018 para cada camión. (Fuente propia)

El promedio anual del tiempo medio entre fallas (Ecuación 12) obtenido para cada camión en el año 2018 es mostrado en la Tabla 5, teniendo como valor mínimo el 34.6 [Horas] del CAMMT65001 y como valor máximo el 104.5 [Horas] del camión 16. La tendencia de los valores descritos en la Tabla 5, se pueden ver al graficarlos:

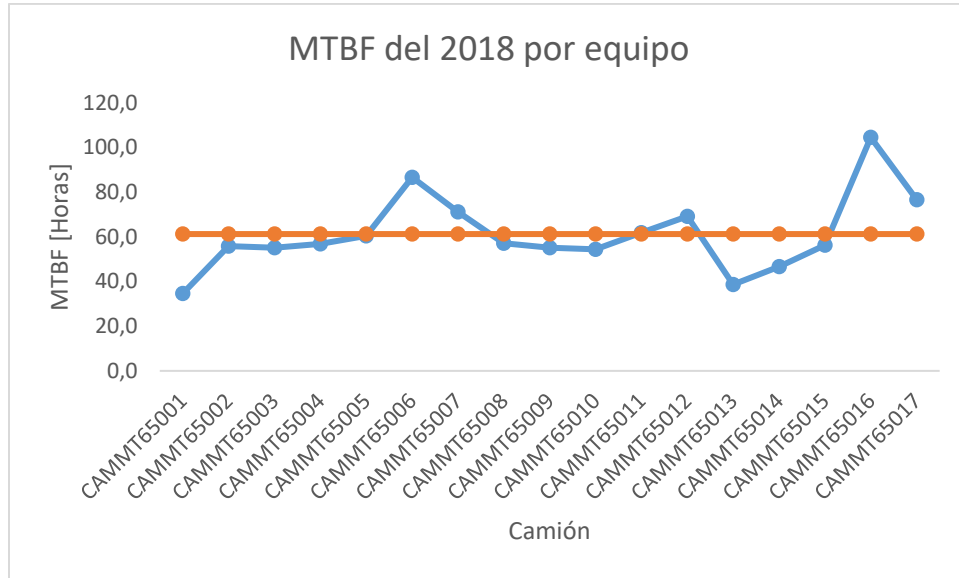


Ilustración 8: Gráfico del MTBF en función de cada camión para el año 2018. (Fuente propia)

En la Ilustración 8, la línea de color naranja representa el promedio (61.2 [Horas]) de los datos de la Tabla 5, lo que nos demuestra que existen 6 camiones que se desvían significativamente del promedio, los cuales son el CAMMT65001, CAMMT65006, CAMMT65007, CAMMT65013, CAMMT65016 y CAMMT65017.

- Para la disponibilidad se tiene:

Camión	Disponibilidad
CAMMT65001	47,8%
CAMMT65002	79,0%
CAMMT65003	80,0%
CAMMT65004	54,7%
CAMMT65005	73,3%
CAMMT65006	78,7%
CAMMT65007	81,1%
CAMMT65008	74,9%
CAMMT65009	81,6%
CAMMT65010	78,3%
CAMMT65011	75,8%
CAMMT65012	82,9%
CAMMT65013	72,7%
CAMMT65014	78,3%

CAMMT65015	45,8%
CAMMT65016	85,7%
CAMMT65017	89,0%

Tabla 6: Disponibilidad del 2018 para camión. (Fuente propia)

La Tabla 6 muestra la disponibilidad (Ecuación 10) que tuvo cada camión en el año 2018. La disponibilidad solicitada por la minera para los camiones MT-65 es de un mínimo del 70%, graficando los datos en conjunto a la disponibilidad solicitada se tiene:

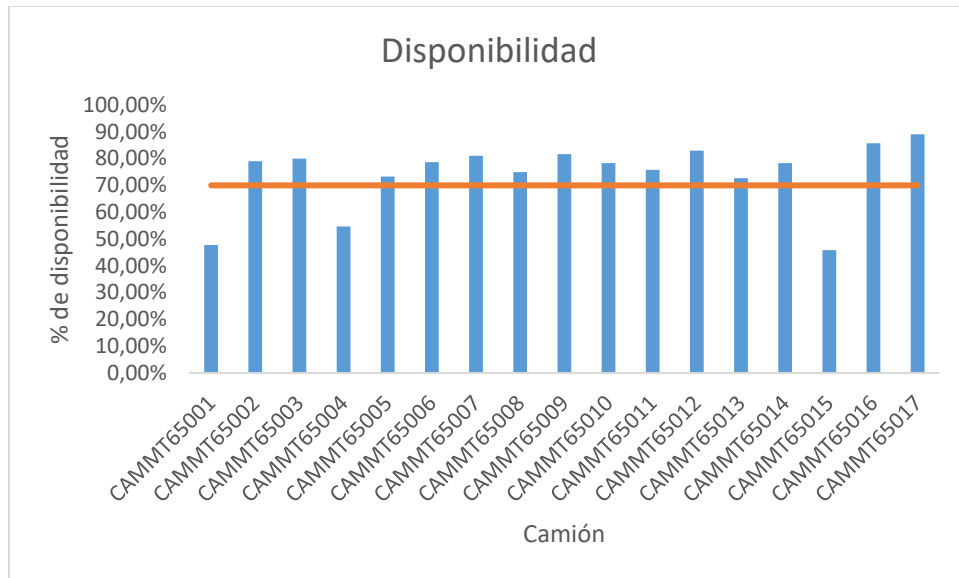


Ilustración 9: Gráfico disponibilidad del 2018 en función de cada camión. (Fuente propia)

La Ilustración 9, muestra la disponibilidad de cada camión para el 2018 y la línea naranja es la disponibilidad solicitada (70%). Esto da cuenta de que todos los equipos están por sobre lo solicitado, sin embargo los más críticos son el CAMMT65001, CAMMT65004 y CAMMT65015 que están por bajo lo solicitado por la empresa. Diferencias que se deben estudiar, ya que todos los camiones operan en las mismas condiciones y con operadores que se van rotando constantemente.

4 Análisis de confiabilidad.

Según los datos que aparecen en la Tabla 6, los equipos que tienen la disponibilidad más baja son el CAMMT65001, CAMMT65004 y CAMMT65015, pero este último ingresó a inicios de octubre (4/10/18) por lo que no tiene la data suficiente para realizar un análisis correcto, por lo que se dejará el estudio solo para el camión 1 y 4, con la finalidad de poder aumentar el índice de ambos equipos.

Los datos necesarios para poder realizar un correcto análisis de confiabilidad son los tiempos de reparación, los tiempos de buen funcionamiento entre reparaciones, tipos

de mantenimiento en cada parada y motivo de reparación. Para esto se descargaron las órdenes de trabajo de cada equipo del año 2018, por medio del ERP utilizado en la empresa (Máximo), rescatando los antecedentes antes mencionados, los cuales son agrupados y resumidos en la Tabla 25 y la Tabla 26, que se encuentran en el Anexo A.

4.1 Parámetros Weibull.

Debido a que dentro de los datos obtenidos desde el inicio en marcha de cada camión en análisis, existen mantenimientos programados y correctivos, lo primero que se debe hacer para obtener los parámetros de Weibull es calcular el ranking de eventos fallas ajustadas (Ecuación 9), para luego realizar el cálculo de fallas acumuladas (Ecuación 8) y de esta forma poder obtener el gráfico Weibull.

Las tablas de ranking de eventos ajustadas de ambos camiones se encuentran en el Anexo B (Tabla 27, para el camión 1 y Tabla 31 para el camión 4), donde también se puede ver las tablas del cálculo de fallas acumuladas (Tabla 28 para el camión 1 y Tabla 32 para el camión 4).

4.1.1 Análisis Weibull CAMMT65001.

Una vez obtenida el valor de la función falla acumulada (Ecuación 8), se puede calcular la función doble logaritmo de la distribución acumulativa (Ecuación 5), para graficar dichos datos y obtener así los parámetros de weibull (α , β y MTBF).

La Tabla 28, contiene los datos necesarios para obtener la función falla acumulada del camión 1, los cuales son linealizados y tabulados en la Tabla 29 (anexo B), datos que al ser graficados queda:

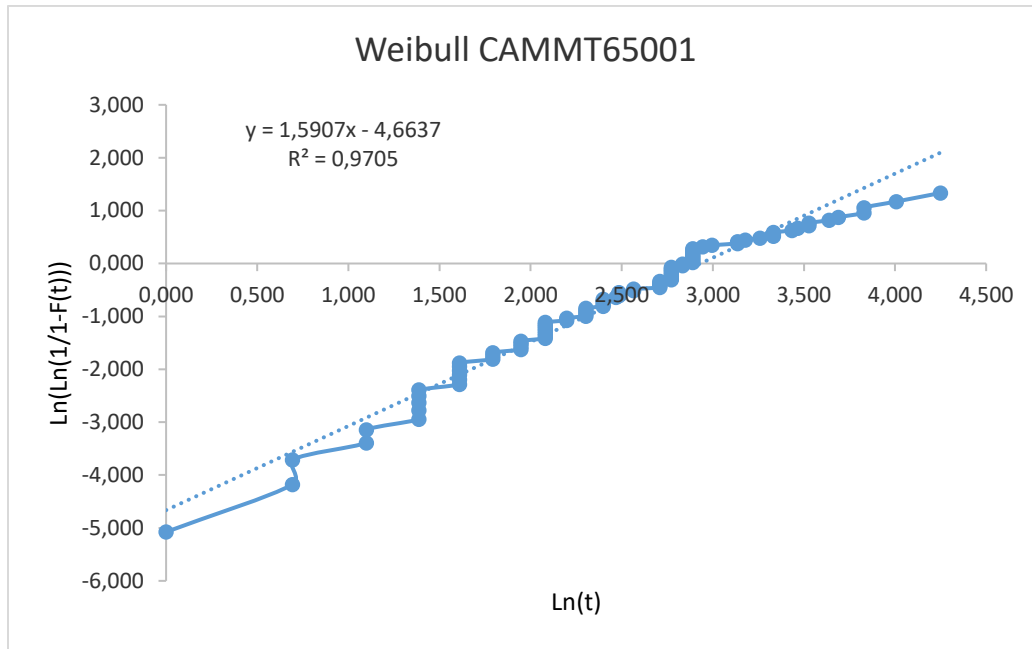


Ilustración 10: Gráfico Weibull CAMMT65001 (Fuente propia)

De la Ilustración 10, se pueden desprender los parámetros alfa, beta y MTBF del camión 1, por medio de la Ecuación 5, Ecuación 7 y la ecuación de la recta entregada en la misma ilustración, los cuales se resumen en la Tabla 7 :

Parámetros	Valor	Unidad
Beta	1,59	-
Alfa	18,76	hrs
MTBF	16,83	hrs

Tabla 7: Parámetros Weibull CAMMT65001 (Fuente propia)

Con estos datos se puede calcular la confiabilidad ($R(t)$), la probabilidad de falla ($F(t)$) y la tasa de falla ($\lambda(t)$), por medio de las Ecuación 3, Ecuación 2 y Ecuación 4 respectivamente, lo cual se resume en la Tabla 30 (ver anexo B). Con estos datos se puede generar la gráfica de $R(t)$, $F(t)$ y $\lambda(t)$ para el camión 1, tal como muestran en las Ilustración 11 e Ilustración 12 respectivamente:

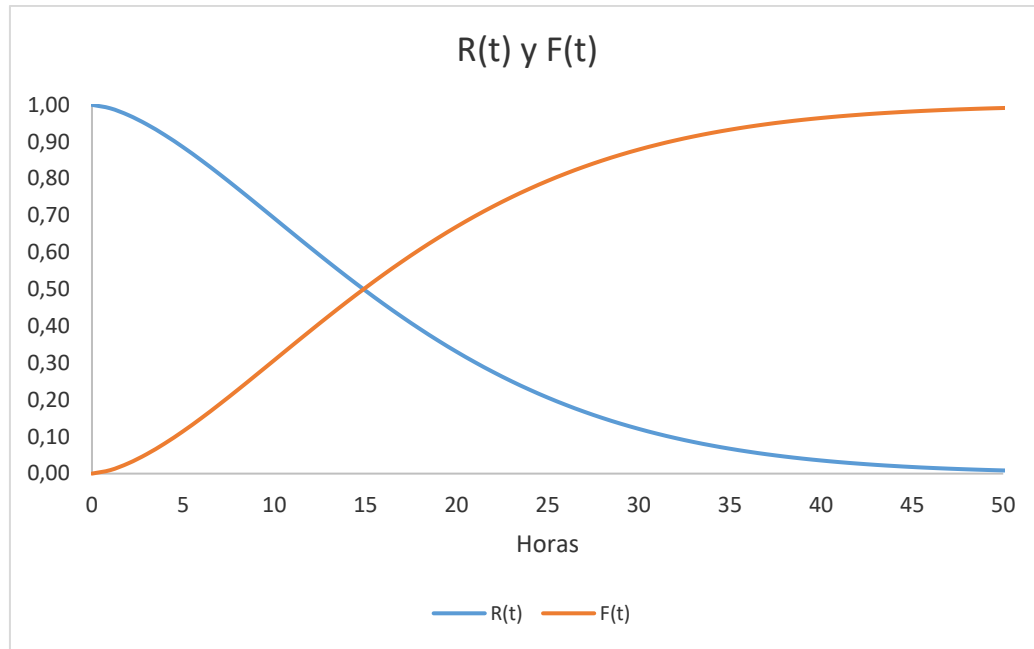


Ilustración 11: Gráfica de $R(t)$ y $F(t)$ en función del tiempo del camión 1 (Fuente propia)

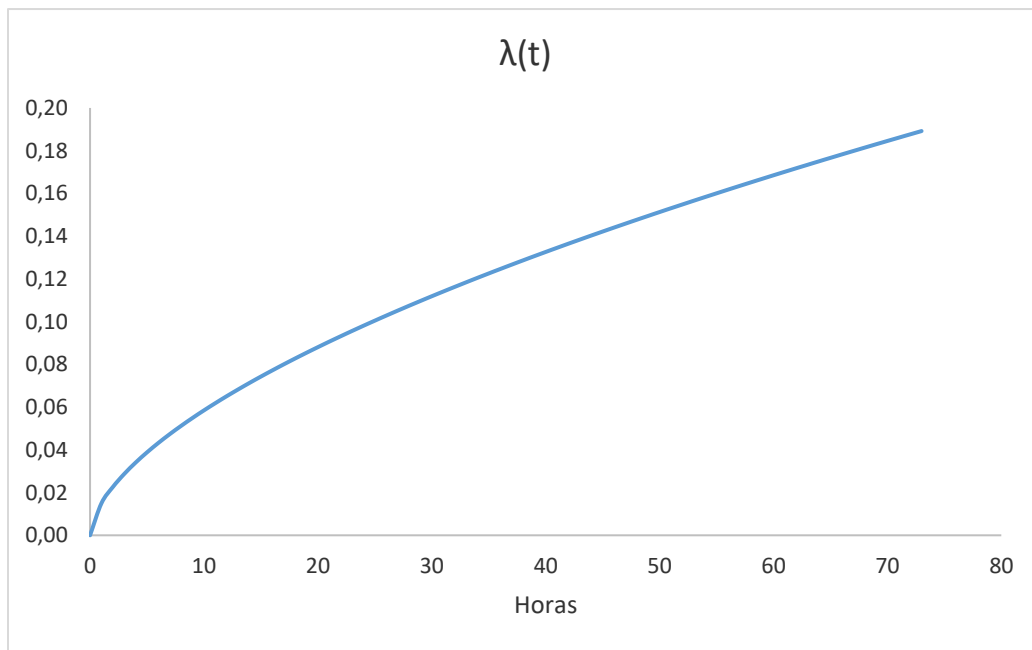


Ilustración 12: Gráfico de la tasa de falla ($\lambda(t)$) en función del tiempo del camión 1. (Fuente propia)

Como se puede observar en la Ilustración 11, la curva de confiabilidad (línea azul) desciende muy cerca del origen (por ejemplo a las 15 horas en operación, la confiabilidad es aproximadamente del 50%) y lo ideal es que las curvas de $R(t)$ y $F(t)$ se intersecten lo

más alejado posible del origen, ya que así la probabilidad de falla al 50% se dará con horas de operación del equipo más prolongadas, lo cual se puede lograr buscando cuales son los imprevistos que influyen en la confiabilidad como por ejemplo las fallas agudas y crónicas que se desprenden del diagrama de dispersión. De igual forma se puede observar que la tasa de falla es creciente, lo que valida la teoría, ya que el β es mayor a 1 en este caso, es decir, se encuentra en fase de desgaste (Ilustración 3), lo cual indica el requerimiento de reforzar los mantenimientos programados y fortalecer el mantenimiento predictivo.

Cabe destacar que la distribución Weibull consta de tres parámetros α , β y γ , donde esta última se define como constante de localización y define el punto de partida o el origen de la distribución, su unidad de medida es el tiempo. Este parámetro no fue usado en este análisis, ya que se usa para mejorar el coeficiente de correlación y en este caso el coeficiente es bueno (0.985), muy cercano a 1, también se usa cuando el parámetro de forma (β) es muy grande (mayor a 10) o cuando los puntos finales o iniciales discrepan de la tendencia que tienen los puntos centrales, por lo que en este caso no existe ninguno de estos motivos para que el parámetro γ sea calculado.

4.1.2 Análisis Weibull CAMMT65004.

Una vez obtenida el valor de la función falla acumulada (Ecuación 8), se puede calcular la función doble logaritmo de la distribución acumulativa (Ecuación 5), para graficar dichos datos y obtener así los parámetros de weibull (α , β y MTBF). Todo esto por medio de Excel, el cual ayuda a realizar estos cálculos.

La Tabla 32 (anexo B), contiene los datos necesarios para obtener la función falla acumulada del camión 4, los cuales son linealizados y tabulados en la Tabla 33(anexo B), datos que al ser graficados queda:

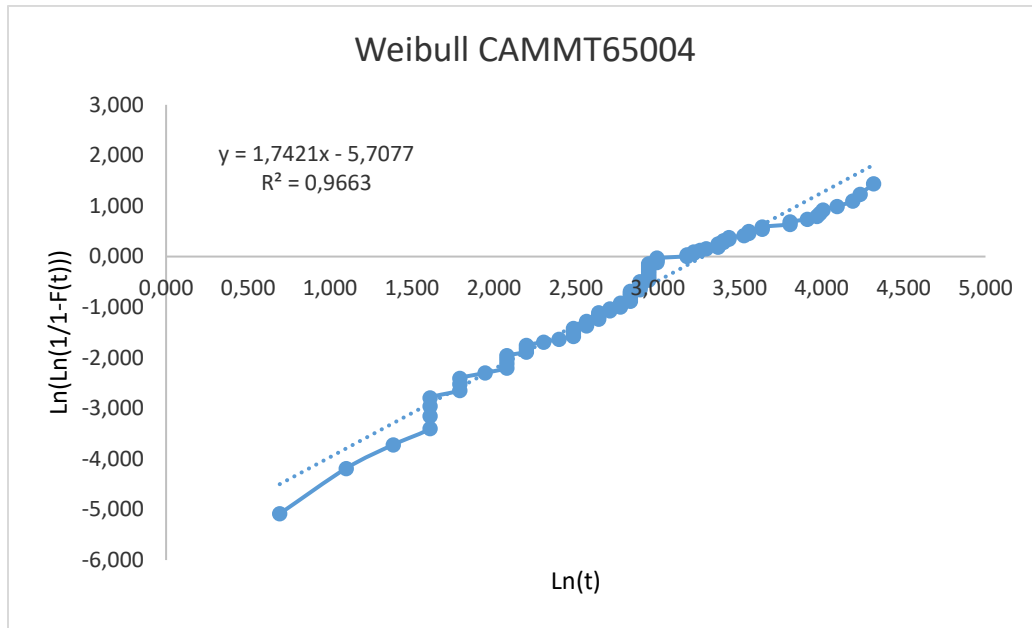


Ilustración 13: Gráfico Weibull CAMMT65004 (Fuente propia)

De la Ilustración 13, se pueden desprender los parámetros alfa, beta y MTBF del camión 4, por medio de la Ecuación 5, Ecuación 7 y la ecuación de la recta entregada en la misma ilustración, los cuales se resumen en la Tabla 8:

Parámetros	Valor	Unidad
Beta	1,74	-
Alfa	26,47	hrs
MTBF	23,58	hrs

Tabla 8: Parámetros Weibull CAMMT65004 (Fuente propia)

Con estos datos se puede calcular la confiabilidad ($R(t)$), la probabilidad de falla ($F(t)$) y la tasa de falla ($\lambda(t)$), por medio de la Ecuación 3, Ecuación 2 y Ecuación 4 respectivamente, lo cual se resume en la Tabla 34 (ver anexo B). Con estos datos se puede generar la gráfica de $R(t)$, $F(t)$ y $\lambda(t)$ para el camión 4, tal como muestran en las Ilustración 14 e Ilustración 15 respectivamente:

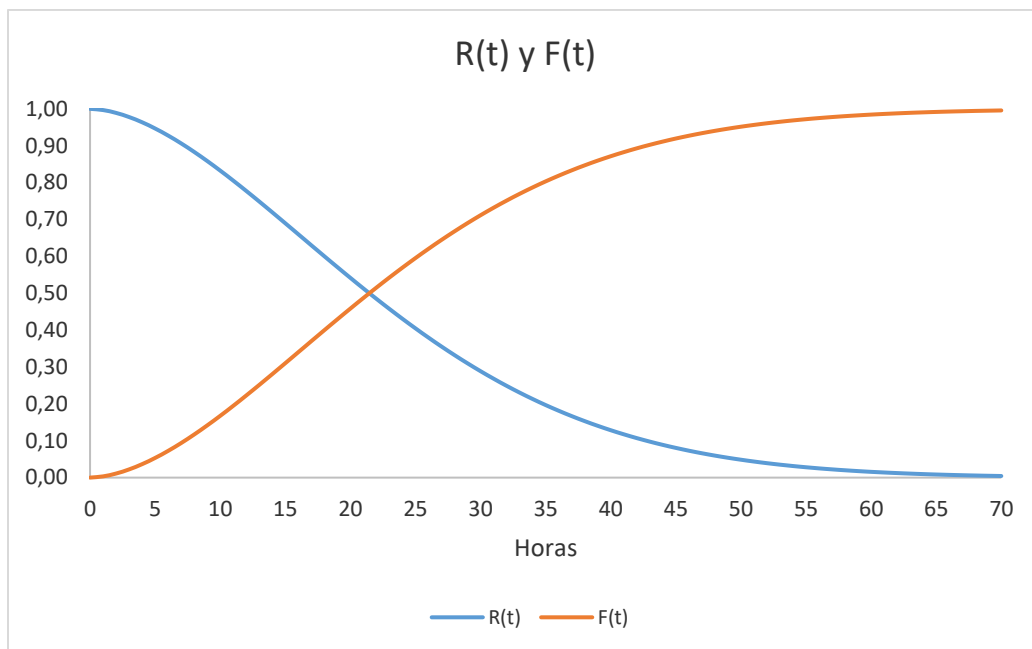


Ilustración 14: Grafica de $R(t)$ y $F(t)$ en función del tiempo camión 4 (Fuente propia)

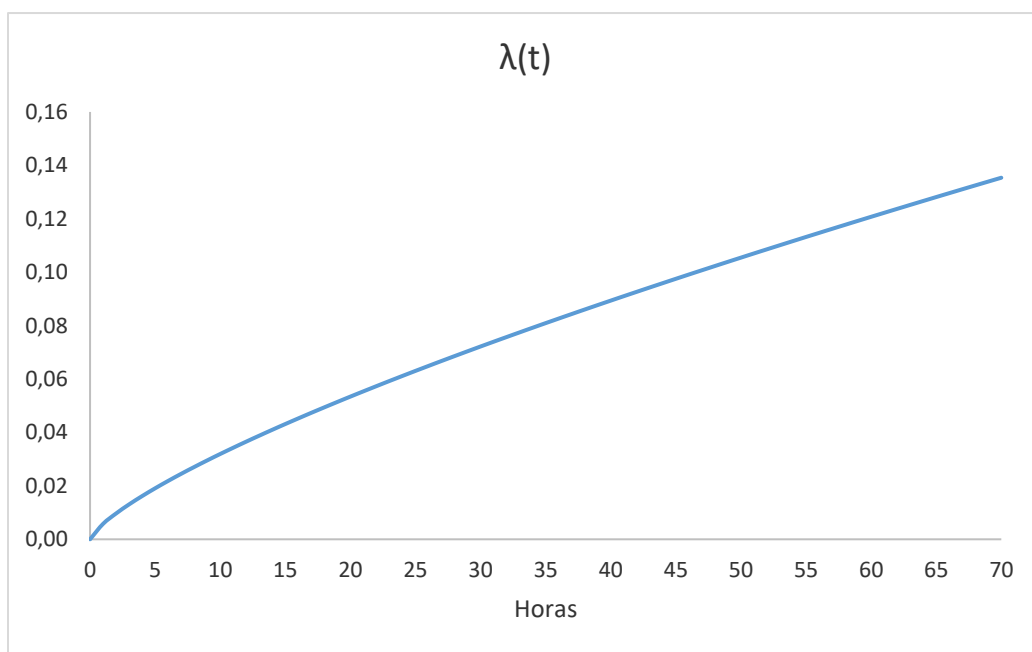


Ilustración 15: Gráfico de la tasa de falla ($\lambda(t)$) en función del tiempo del camión 4. (Fuente propia)

Al comparar los datos de ambos camiones (Tabla 30 y Tabla 34, ver anexo B) se puede confirmar que para el camión 4 la confiabilidad igual a 50% llega a las 21 horas aproximadamente y para el camión 1 dicha cifra llega a las 15 horas, lo cual refleja que el camión 4 es más confiable que el 1, sin embargo de igual forma se deben evaluar ambos para mejorar considerablemente este indicador. Para la tasa de falla, se tiene que

la del camión 4 crece en forma cercana a una recta, lo que valida la teoría, debido a que el β en este caso es mayor a 1, es decir, al igual que en el caso del camión 1, se deben reforzar los mantenimientos programados y fortalecer el mantenimiento predictivo.

Al igual que en el análisis del camión 1, no se usa el parámetro γ (constante de localización), ya que el coeficiente de correlación es cercano a 1 (0.983), por lo que por este motivo no se hace necesario el mejorarlo, también se calcula cuando el parámetro de forma (β) es muy grande (mayor a 10) o cuando los puntos finales o iniciales discrepan de la tendencia que tienen los puntos centrales, por lo que en este caso no existe ninguno de estos motivos para que el parámetro γ sea calculado.

La forma de buscar cuales son los componentes que afectan tanto los índices de confiabilidad y disponibilidad de estos equipos es necesario realizar un diagrama de dispersión y buscar mejoras para los componentes que se encuentren tanto en el cuadrante de crónico y agudos como por encima de la iso – indisponibilidad.

Una vez encontrado que componentes afectan a los índices estudiados, se buscaran mejoras por medio del método MAPEC, en el cual se describen las fallas funcionales y se buscan todas las posibles causas que las ocasionan. De esta forma se propondrán las mejoras (con ayuda de personal calificado) para minimizar todos los imprevistos que pueda tener el componente y por consiguiente elevar la confiabilidad del equipo, además de mejorar las pautas de mantenimientos actuales, incorporando a ellas tareas encontradas gracias a este método.

4.2 Análisis Jack – Knife.

Para poder identificar que sistemas, sub-sistemas y componentes influyen en la confiabilidad y disponibilidad de los equipos se realizará un análisis Jack – Knife para ambos camiones. Con los datos obtenidos de la información recopilada durante el año 2018 en el software Máximo, los cuales se resumen en la Tabla 35 y la Tabla 36 (Anexo C) se pueden encontrar las fallas desglosadas según taxonomía del equipo, las frecuencias de ocurrencia de fallas y el MTTR de cada una de ellas, datos necesarios para crear los gráficos antes mencionados.

4.2.1 Jack – Knife CAMMT65001

Con el fin de llegar hasta el componente a analizar, es que se realizarán gráficos de dispersión para los sistemas, luego para los sub-sistemas de los sistemas que afectan a la disponibilidad y al final de los componentes de estos sub-sistemas.

- Sistemas: La cantidad de fallas y el MTTR de estas, para cada sistema del camión 1 son resumidas en la Tabla 9:

		FRECUENCIA	TFS	FRECUENCIA	MTTR
SISTEMA	ITEM	[1/PERIODO]	[HRS/PERIODO]	[1/HRS]	[HRS]
ELECTRICO	1	14	69,67	0,0017	4,98
HIDRAULICO	2	7	59,17	0,0009	8,45
MOTOR	3	8	63,33	0,0010	7,92
TREN DE POTENCIA	4	17	118,83	0,0021	6,99
CHASIS	5	11	53,83	0,0014	4,89
CABINA	6	23	106,27	0,0028	4,62
ENGRASE CENTRALIZADO	7	14	39,50	0,0017	2,82
PROMEDIO	-	13,43	72,94	0,0017	5,81
TOTAL	-	94	510,6	0,0116	40,67

Tabla 9: Datos de frecuencia y MTTR de los sistemas del camión 1. (Fuente propia)

La cantidad de horas para el periodo de análisis para el CAMMT65001 es de 8136 horas (desde que inició sus trabajos, 1/1/18 hasta 31/12/18). Además el límite MTTR es 5,81 y el límite n es 0,0017 las que fueron calculadas según la Ecuación 13 y Ecuación 14 respectivamente. Estos datos son representados en la Ilustración 16:

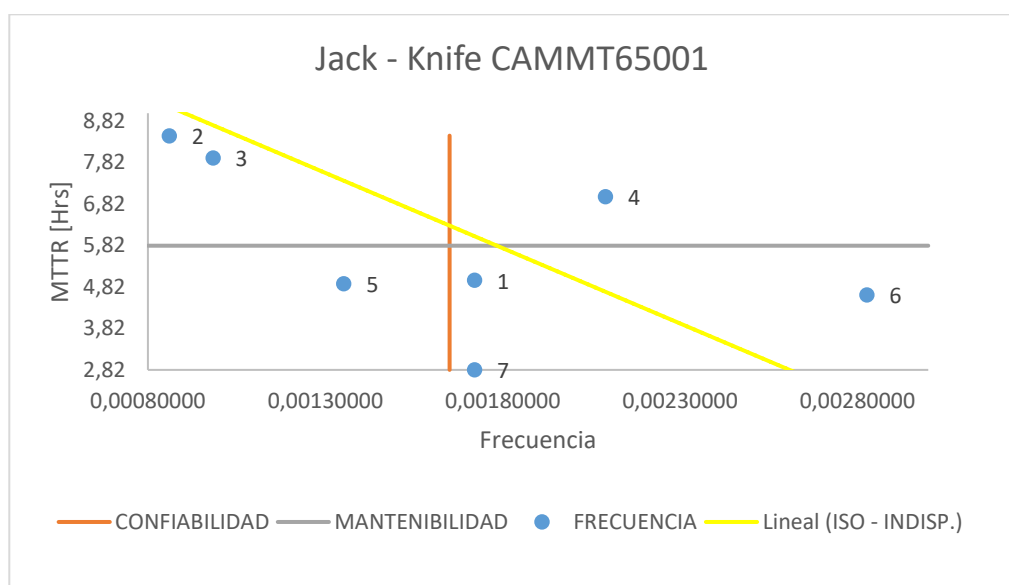


Ilustración 16: Gráfico de dispersión para los sistemas del camión 1. (Fuente propia)

En la Ilustración 16, se muestra que los puntos 4 y 6 (tren de potencia y cabina) son los sistemas que están afectando los problemas de disponibilidad del CAMMT65001, ya que ambos puntos se encuentran por encima de la iso de indisponibilidad (línea amarilla), además el tren de potencia también afecta a la confiabilidad del equipo por estar encima del límite de confiabilidad. Por lo que son estos los sistemas que se

seguirán examinando (sus sub-sistemas) para encontrar cuales son los componentes que afectan a la disponibilidad y la confiabilidad del camión 1.

- Tren de potencia: A continuación en la Tabla 10 se muestran los datos de frecuencia de fallas y MTTR de estas para los sub-sistemas del tren de potencia del camión 1.

TREN DE POTENCIA	ITEM	FRECUENCIA	TFS	FRECUENCIA	MTTR
		[1/PERIODO]	[HRS/PERIODO]	[1/HRS]	[HRS]
DIFERENCIAL DELANTERO	1	1	4,83	0,0003	4,83
DIFERENCIAL TRASERO	2	1	4,17	0,0003	4,17
TRANSMISION	3	3	6,83	0,0010	2,28
NEUMATICO	4	10	83,00	0,0032	8,30
LINEA CARDANICA	5	2	20,00	0,0006	10,00
PROMEDIO	-	3,40	23,77	0,0011	5,92
TOTAL	-	17	118,83	0,0054	29,58

Tabla 10: Datos de frecuencia y MTTR de los sub-sistemas del tren de potencia del camión 1. (Fuente propia)

En este caso los límites MTTR y n son 5,92 y 0,0011 respectivamente (calculados con la Ecuación 13 y Ecuación 14). Con estos datos ya se puede realizar el gráfico de dispersión de los sub-sistemas del tren de potencia, lo cual queda representado en la Ilustración 17: Diagrama Jack - Knife de los sub-sistemas del tren de potencia del camión 1 Ilustración 17:

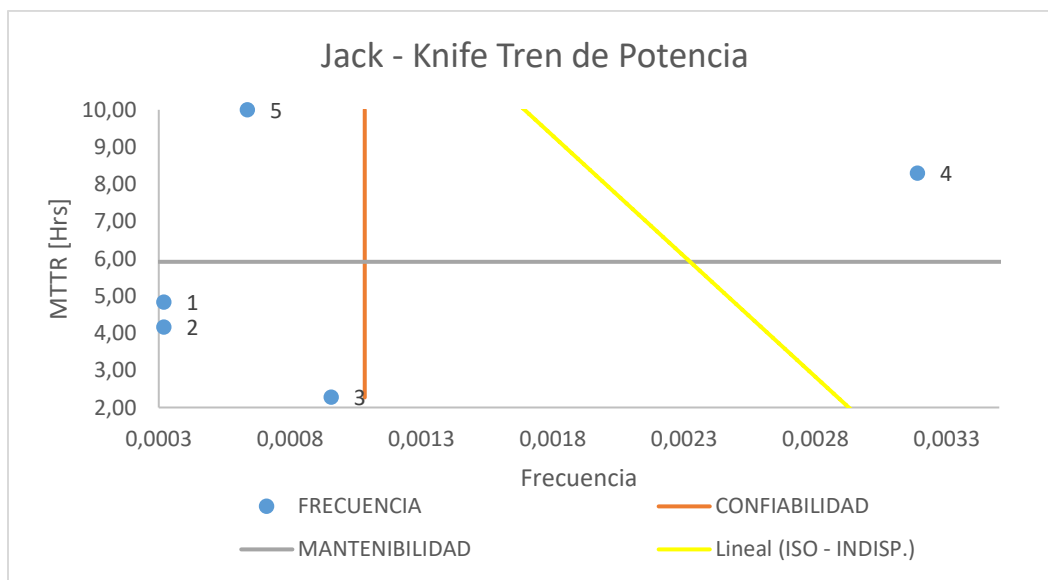


Ilustración 17: Diagrama Jack - Knife de los sub-sistemas del tren de potencia del camión 1. (Fuente propia)

El único punto que se encuentra por encima de la iso de indisponibilidad es el 4, que además también está por encima del límite de confiabilidad, punto que representa al sub-sistema neumático, por lo que será este el que se analizará para poder aumentar la disponibilidad y confiabilidad del equipo 1.

- Cabina: Las frecuencia de las fallas de los sub-sistemas de la cabina junto al MTTR de cada una de estas, están resumidas en la Tabla 11:

CABINA	ITEM	FRECUENCIA	TFS	FRECUENCIA	MTTR
		[1/PERIODO]	[HRS/PERIODO]	[1/HRS]	[HRS]
AIRE ACONDICIONADO	1	13	82,60	0,0041	6,35
CABINA	2	5	3,83	0,0016	0,77
INSTRUMENTOS	3	2	15,33	0,0006	7,67
ASIENTO	4	2	2,83	0,0006	1,42
LIMPIA PARABRISAS	5	1	1,67	0,0003	1,67
PROMEDIO	-	4,6	21,25	0,0015	3,57
TOTAL	-	23	106,27	0,0073	17,87

Tabla 11: Datos de frecuencia y MTTR de los sub-sistemas de la cabina del camión 1. (Fuente propia)

Usando la Ecuación 13 y Ecuación 14 se calculan los límites MTTR y n que en este caso son 3,57 y 0,0015 respectivamente. Con estos datos ya se puede realizar el gráfico de dispersión de los sub-sistemas de la cabina, lo cual queda representado en la Ilustración 18:

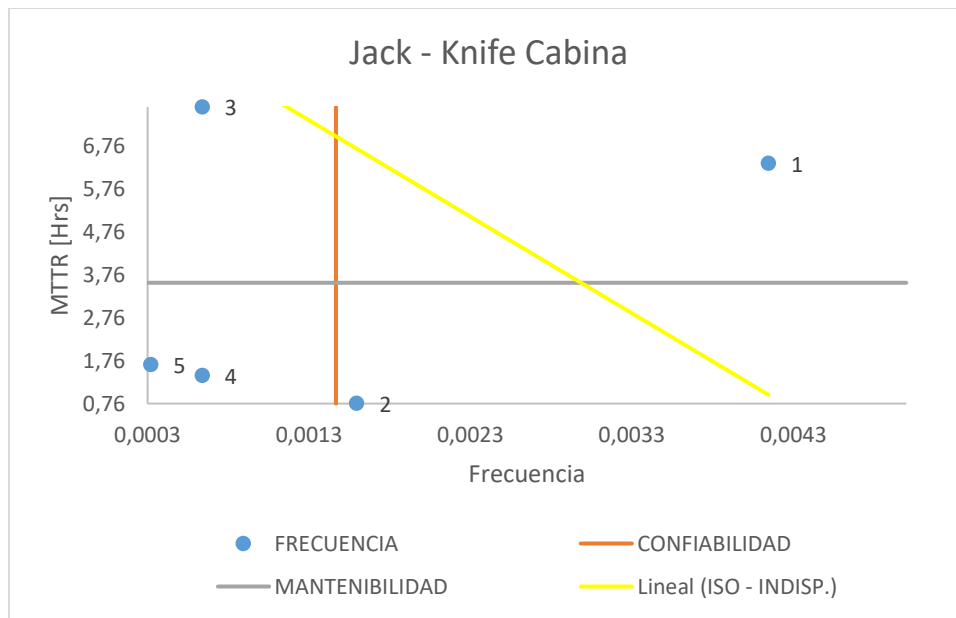


Ilustración 18: Diagrama Jack - Knife de los sub-sistemas de la cabina del camión 1. (Fuente propia)

El punto 1 (aire acondicionado) es el único que está por encima de la iso indisponibilidad y que además está por encima del límite de confiabilidad, por ende es el único que será desglosado en sus componentes para identificar cuáles son los que serán analizados posteriormente.

- Aire Acondicionado: Los componentes, frecuencias de fallas y MTTR de este sub-sistema son especificados en la Tabla 12:

AIRE ACONDICIONADO	ITEM	FRECUENCIA	TFS	FRECUENCIA	MTTR
		[1/PERIODO]	[HRS/PERIODO]	[1/HRS]	[HRS]
COMPRESOR	1	3	10,60	0,00096	3,53
EVAPORADOR	2	1	1,17	0,00032	1,17
FILTRO SECADOR	3	1	2,50	0,00032	2,50
LINEA DE ALIMENTACION	4	1	9,33	0,00032	9,33
TERMOSTATO	5	6	53,50	0,00191	8,92
VALVULA DE EXPANSION	6	1	5,50	0,00032	5,50
PROMEDIO	-	2,17	13,77	0,00069	5,16
TOTAL	-	13	82,60	0,00415	30,95

Tabla 12: Datos de frecuencia y MTTR de los componentes del aire acondicionado del camión 1. (Fuente propia)

Según los datos de la Tabla 12, los límites MTTR Y n son 5,16 y 0,00069 respectivamente. Toda esta información está contenida gráficamente en la Ilustración 19:

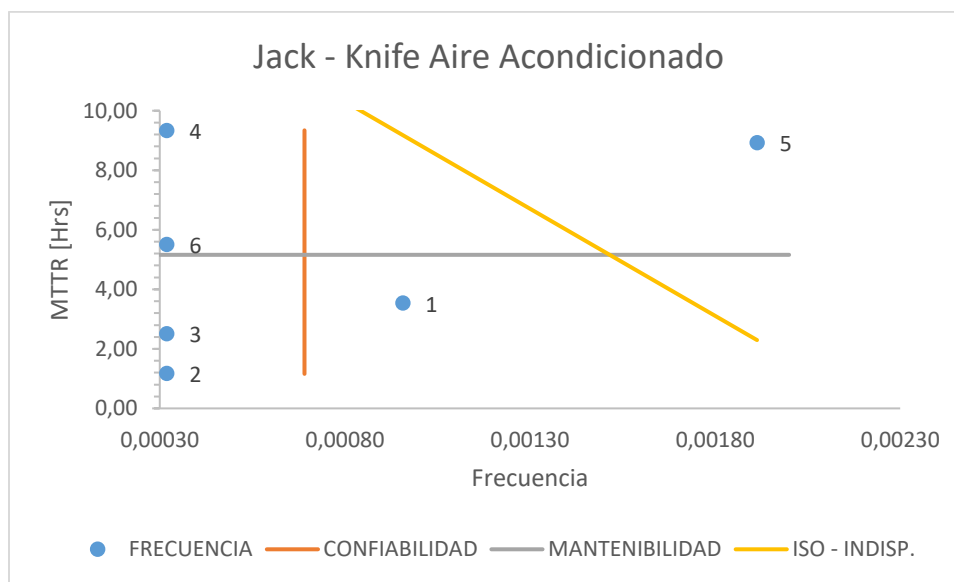


Ilustración 19: Diagrama Jack - Knife de los componentes del aire acondicionado del camión 1. (Fuente propia)

El termostato (punto 5) es el componente que debe ser analizado para mejorar la disponibilidad y confiabilidad del equipo, ya que es el único que está por sobre la iso de indisponibilidad y límite de confiabilidad.

Finalmente los componentes que influyen en la disponibilidad y confiabilidad del equipo 1 son los neumáticos y el termostato del aire acondicionado, por lo que son estos los candidatos a ser analizados para buscar mejoras y así aumentar estos índices del equipo.

4.2.2 Jack – Knife CAMMT65004.

Al igual que el camión 1, se determinaran cuáles son los sistemas, sub-sistemas y componentes que afectan a la disponibilidad y confiabilidad del equipo número 4, para poder realizar un análisis y encontrar mejoras para implementar en el equipo con el fin de mejorar dicho indicador. Los datos necesarios para poder realizar estos diagramas vienen de la Tabla 36 (ver anexo B).

- Sistemas: La Tabla 13 contiene los sistemas, datos de las frecuencias de fallas y MTTR del camión 4:

SISTEMA	ITEM	FRECUENCIA	TFS	FRECUENCIA	MTTR
		[1/PERIODO]	[HRS/PERIODO]	[1/HRS]	[HRS]
ELECTRICO	1	7	43,80	0,0009	6,26
HIDRAULICO	2	8	50,17	0,0010	6,27
MOTOR	3	9	43,50	0,0012	4,83
CHASIS	4	7	22,17	0,0009	3,17
TREN DE POTENCIA	5	30	151,83	0,0039	5,06
ENGRASE CENTRALIZADO	6	20	45,33	0,0026	2,27
CABINA	7	12	50,33	0,0016	4,19
PROMEDIO	-	13,3	58,16	0,0017	4,58
TOTAL	-	93	407,13	0,0122	32,05

Tabla 13: Datos de frecuencia y MTTR de los sistemas del camión 4. (Fuente propia)

La cantidad de horas del periodo para el camión 4 son 7632 horas (desde que inició sus trabajos, 9/2/18 hasta 31/12/18) y según los datos obtenidos en la el límite MTTR es 4,58 y el límite n es 0,0017 (Ecuación 13 y Ecuación 14 respectivamente), con lo cual se procede a generar el gráfico de dispersión de los sistemas del equipo:

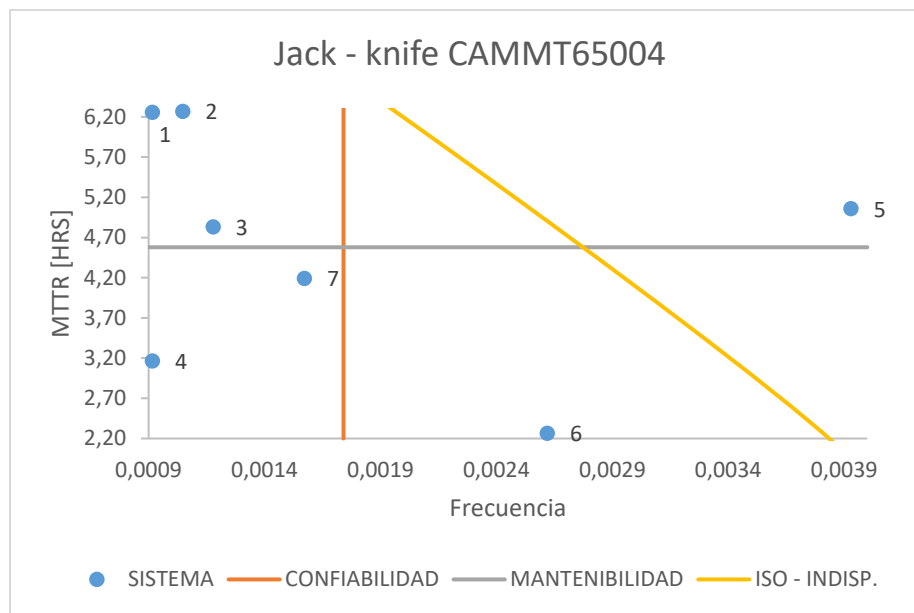


Ilustración 20: Gráfico de dispersión para los sistemas del camión 4. (Fuente propia)

De la Ilustración 20 se puede ver que el único punto por sobre el iso de indisponibilidad es el 5 que representa al tren de potencia, además de estar por encima del límite de confiabilidad, así este será el sistema en el que se indagará para saber cuál es el componente que influye en la baja disponibilidad y confiabilidad del equipo 4.

- Tren de potencia: Los sub-sistemas, frecuencias de fallas y MTTR, se resumen en la Tabla 14:

		FRECUENCIA	TFS	FRECUENCIA	MTTR
TREN DE POTENCIA	ITEM	[1/PERIODO]	[HRS/PERIODO]	[1/HRS]	[HRS]
DIFERENCIAL TRASERO	1	1	1,00	0,00013	1,00
TRANSMISION	2	11	59,67	0,00144	5,42
NEUMATICO	3	17	73,17	0,00022	4,30
LINEA CARDANICA	4	1	18,00	0,00013	18,00
PROMEDIO	-	7,5	37,96	0,00048	7,18
TOTAL	-	30	151,83	0,00193	28,73

Tabla 14: Datos de frecuencia y MTTR de los sub-sistemas del tren de potencia del camión 4. (Fuente propia)

Según los datos de la Tabla 14, los limites MTTR Y n son 7,18 y 0,00048 respectivamente. Toda esta información está contenida gráficamente en la Ilustración 21:

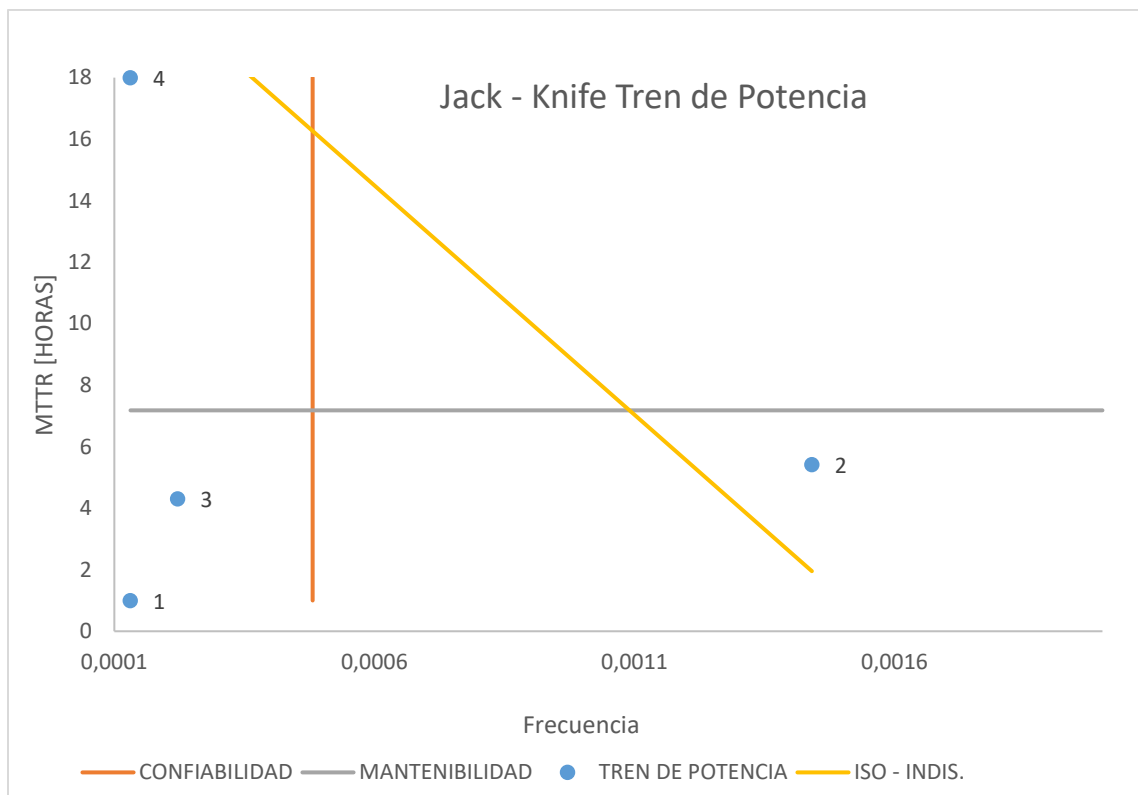


Ilustración 21: Diagrama Jack - Knife de los sub-sistemas del tren de potencia del camión 4. (Fuente propia)

El único punto que se encuentra por encima de la iso de indisponibilidad es el 2, el cual representa al sub-sistema transmisión, por lo que será este en el que se indagará para poder aumentar la disponibilidad del equipo 4.

- Transmisión: Los datos necesarios para realizar un diagrama Jack – Knife de los componentes de la transmisión, como lo son la frecuencia de las fallas y el MTTR de estas, se ilustran en la Tabla 15:

TRANSMISION	ITEM	FRECUENCIA	TFS	FRECUENCIA	MTTR
		[1/PERIODO]	[HRS/PERIODO]	[1/HRS]	[HRS]
FLEXIBLES	1	9	47,17	0,00118	5,24
TRANSMISION	2	2	12,50	0,00026	6,25
PROMEDIO	-	5,5	29,83	0,00072	5,75
TOTAL	-	11	59,67	0,00144	11,49

Tabla 15: Datos de frecuencias de fallas y MTTR de los componentes de la transmisión del camión 4. (Fuente propia)

Con los datos de la Tabla 15 y junto a la Ecuación 13 y la Ecuación 14 se tiene que el límite MTTR y n son 5,75 y 0,00072 respectivamente, por lo que el diagrama de Jack – Knife para los componentes de la transmisión es:

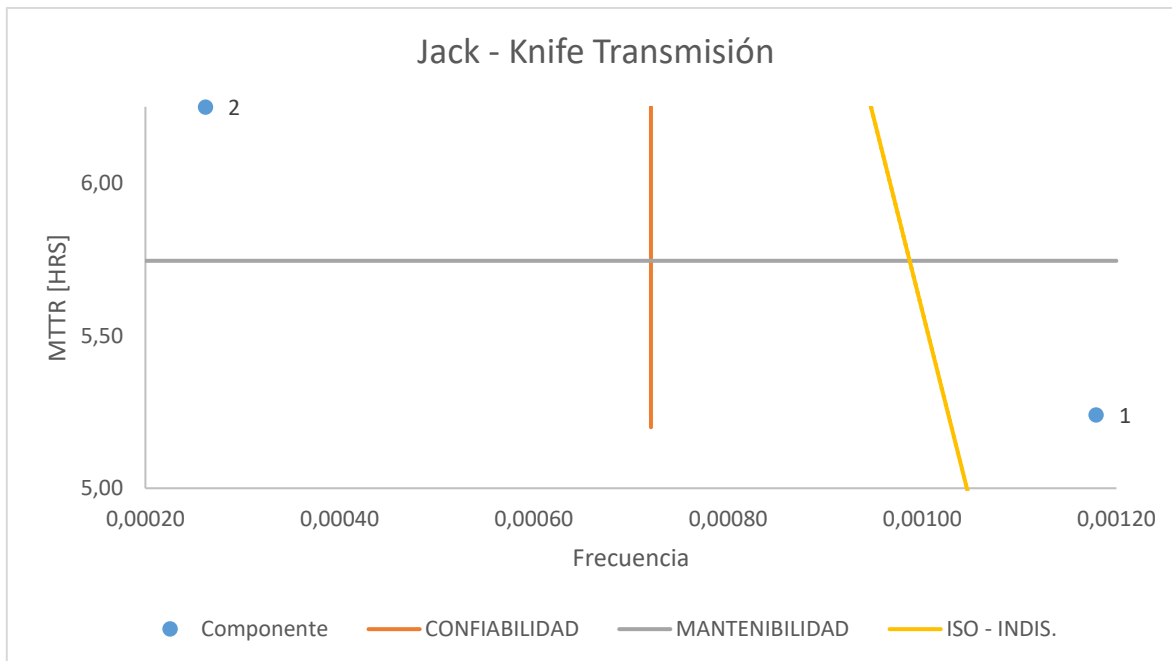


Ilustración 22: Diagrama Jack - Knife de los componentes de la transmisión del camión 4. (Fuente propia)

En la Ilustración 22, se puede apreciar que el punto 1 que representa a los flexibles de la transmisión es el que conlleva a los problemas de disponibilidad del equipo. Por ende del camión 4 se analizarán los flexibles de la transmisión para mejorar el índice de disponibilidad del equipo.

5 Oportunidades de Mejora.

Al momento de encontrar mejoras para cada punto que está por sobre la iso de indisponibilidad de cada diagrama Jack – Knife, aparte de aumentar el índice de disponibilidad del camión 1 y 4, también se estará aumentando la confiabilidad de estos equipos, ya que cada uno de estos puntos que serán analizados están a la derecha del límite n, el cual también refleja el límite de buena confiabilidad, es decir, todos los puntos que están a la derecha de esta línea, tienen problemas con la confiabilidad, y así se podrá mejorar los gráficos que se muestran en la Ilustración 11 e Ilustración 14.

La herramienta que se utilizará para analizar y encontrar mejoras para los puntos antes descritos es el MAFEC, ya que es un método simple que ayuda a minimizar las fallas especialmente crónicas (que afectan a la confiabilidad, según el diagrama Jack-Knife) además que permite identificar y eliminar cualquier fuente de riesgo. Es así que, se tendrán 3 MAFEC distintos, el primero el de los neumáticos del camión 1, el segundo el

termostato del aire acondicionado del mismo equipo y finalmente el tercero que consta del análisis de los flexibles de la transmisión del camión 4.

Sin duda alguna y como recomendación al área de mantenimiento mina de la empresa minera, cuando se quiere resolver de raíz un problema es necesario tener información sobre el mismo que permita identificar cuándo, dónde y bajo qué condiciones se da tal problema, y con qué magnitud; es decir, es necesario encontrar su regularidad y sus fuentes de variabilidad. El tener una data que contenga la variabilidad de los datos, ayuda para encontrar mejoras que se apliquen al uso exclusivo que se le da a cada equipo, con lo que se puede minimizar dicha variabilidad y tener datos más centrados respecto a la tendencia central. En este caso se propondrán mejoras en general según las condiciones estándar en las que se encuentran normalmente los equipos trabajando, ya que solo se trabajó con el promedio de los datos (debido a que la empresa solo trabaja con promedios y no la variabilidad).

5.1 MAFEC Neumáticos.

Los neumáticos son un componente del sistema tren de potencia, y debido a que están bastante expuestos a diversos elementos del ambiente, su falla es muy frecuente si es que estos elementos no son controlados oportunamente. Como se puede observar en la Tabla 10, el MTTR de los neumáticos es bastante alto (8.33 horas), lo que influye mucho en la disponibilidad del equipo, demorando tiempo prolongado en cambiar uno de estos. Es por todo lo recién explicado que en la Tabla 16 se ilustra el MAFEC para los neumáticos, el cual se realizó con ayuda de las Tabla 37, Tabla 38 y Tabla 39 (ver anexo C), para dar valoración a los índices de severidad, ocurrencia y detectabilidad y con así poder calcular el número de prioridad de riesgo RPN (Ecuación 15), además de pedir el apoyo al técnico de neumáticos del área, con quien se trabajó en conjunto para completar la siguiente tabla:

Función	Fallas funcionales	Modos de Falla	(O)	Efecto de los Fallos	(S)	(D)	RPN			
Rodar por el suelo	No poder rodar	I	Pinchado	6	Rodar solo con la llanta, provocando inestabilidad.	7	2	84		
					Salida del aire del interior del neumático	7		84		
		II	Desgaste	2	Desprendimiento de material del neumático hasta que la superficie del mismo no resista las condiciones del terreno.	5		20		
					neumático revienta repentinamente	9	2	36		
					Contaminación el medio ambiente con material de desecho de neumático	5		20		
		III	Ruptura	2	Repentino desprendimiento de material del neumático que va desde la estructura exterior hasta la interior, escapando el aire rápidamente.	5		10		
					neumático revienta repentinamente	9	1	18		
					Contaminación del ambiente por caucho del neumático	5		10		
		Rodar un máximo de 14 Km en 1 hora	Rodar más de 14 Km en 1 hora	I	Alta Velocidad	5	Sobre calentamiento del neumático, provocando altas presiones y posibles pinchados.	5	1	25
							neumático revienta repentinamente	9		45
Soportar el peso del camión	Soportar más peso del camión	I	Sobrecargar el camión	7	Se ejerce mayor presion entre neumático y piso, provocando con mayor facilidad el pinchado o ruptura.	7		49		
					neumático revienta repentinamente	9	1	63		
					Desprendimiento de material del neumático con facilidad, contaminando el ambiente	5		35		
Amortiguar las irregularidades del camino	No amortiguar	I	Alta presión	5	La banda de rodado del neumático solo roza en la parte central, provocando amortiguamiento no uniforme	4	5	100		
					II	Ruptura	1	Repentino desprendimiento de material del neumático que va desde la estructura exterior hasta la interior, escapando el aire rápidamente llevando la llanta a suelo.	5	1
		Material contaminante queda en el ambiente	5					5		
		III	Pinchado	6	Descontrol del equipo, posible colisión.	9		108		
					Rodar solo con la llanta, provocando inestabilidad.	7	2	84		
					Salida del aire del interior del neumático	7		84		
		IV	Baja presión	6	Rodar solo con la llanta, provocando inestabilidad.	7		210		
					Inflado deficiente, provocando amortiguación no uniforme y deficiente	5	5	150		

Tabla 16: MAFEC neumáticos CAMMT65001. (Fuente propia)

Como se puede ver en la Tabla 16, el RPN más alto se registra en el modo de falla de baja presión, cuya consecuencia es rodar solo con la llanta provocando inestabilidad, la que pondero un puntaje de 210, siguiendo con el mismo modo de falla, pero con consecuencia de inflado deficiente, provocando amortiguación no uniforme y deficiente con un puntaje de 150. Otro modo de falla a los que se les debe prestar atención es la de alta presión y pinchado, los cuales ponderaron mayor o igual a un puntaje de 100.

5.1.1 Mejoras para los neumáticos.

Para encontrar las mejoras oportunas a las fallas funcionales descritas en la Tabla 16, se pidió ayuda al técnico de neumáticos que trabaja en el área y así poder encontrar mejoras aplicadas según a las circunstancias reales que se tienen en la empresa.

Debido a que los camiones estudiados son utilizados para minería subterránea, la mayor cantidad de razones de pinchado y ruptura es por las rocas tanto en el terreno como en las paredes de la mina, es por esto que como mejora a implementar para minimizar estos modos de falla son.

- Correcta limpieza del suelo de la mina (para evitar pinchado por piedras en el suelo)
- Mejor capacitación de los operadores de estos equipos para no pasar cerca de las paredes de la mina (evitar las rupturas de la banda lateral por roce con piedras en las paredes de la mina).

Otros modos de falla que tienen consecuencia de pinchado del neumático es la alta velocidad de los camiones y la excesiva carga de estos, por lo que las mejoras a implementar para minimizar estos modos de fallas son:

- Mejorar el monitoreo de velocidades y carga de los equipos, por parte de operadores y personal encargado de operaciones

Para mitigar las variaciones excesivas de presión de los neumáticos se propone:

- Mantenimiento preventivo por parte de los operadores de cada camión, utilizando el tiempo muerto para cargar combustible antes de empezar la jornada laboral, en medir la presión de los 4 neumáticos con un manómetro y regular según especificaciones del departamento de mantenimiento, ya sea sacando aire como inyectando este con un compresor instalado en la misma bomba donde se carga combustible.

Finalmente para controlar el desgaste, la mejora propuesta es:

- Mantenimiento predictivo, el cual consta en medir la altura de los surcos de la banda de rodado de los neumáticos en cada pauta de 250 horas, para así llevar un correcto monitoreo y proyectar los cambios de neumáticos en el momento mejor indicado.

5.2 MAFEC Termostato.

El sub-sistema de aire acondicionado es primordial para el bienestar del operador, el cual lo ayuda a amortiguar las altas temperaturas tanto en el interior como en el exterior de la mina, por lo que se hace crucial para que estos trabajadores realicen sus labores de

forma eficiente y así mejorar la productividad de la empresa. Debido a lo recién descrito y agregando los análisis reflejados por la Ilustración 19, este sub-sistema también afecta al departamento de mantenimiento impactando en el índice de disponibilidad del equipo y su confiabilidad, por ende se realiza un análisis MAFEC para buscar mejoras que optimicen esta condición, representada por la Tabla 17, en la cual también participó el mecánico especialista en aire acondicionado del área:

Función	Fallas funcionales	Modos de Falla	(O)	Efecto de los Fallos	(S)	(D)	RPN
Impedir formación de hielo	No es capaz de impedir la formación de hielo	1 Sensor desgastado	3	Incapaz de detectar la temperatura correcta del evaporador, por lo que el compresor seguirá trabajando sin	4	5	60
		2 Sensor contaminado	4	El sensor esta obstruido con material externo, por lo que la temperatura que capta no es la correcta, dejando que el compresor trabaje sin parar.	3	7	84
		3 Conexión permanente	4	El termostato trabaja constantemente, lo que gatilla que el compresor no resiva señal de temperatura optima y no deja de trabajar.	4	7	112
Trabajar entre los -3 y 10 °C	Trabajar a temperaturas menores a los -3 °C	1 Sensor desgastado	3	Incapaz de detectar la temperatura correcta del evaporador, por lo que el compresor seguirá trabajando sin parar en el momento más oportuno.	4	5	60
		2 Sensor contaminado	4	El sensor esta obstruido con material externo, por lo que la temperatura que capta no es la correcta, dejando que el compresor trabaje sin parar oportunamente	3	7	84
	Trabajar a temperaturas mayores a los 10 °C	1 Sensor desgastado	3	Incapaz de detectar la temperatura correcta del evaporador, por lo que el compresor seguirá trabajando sin parar en el momento más oportuno.	4	5	60
		2 Sensor contaminado	4	El sensor esta obstruido con material externo, por lo que la temperatura que capta no es la correcta, dejando que el compresor trabaje sin parar	3	7	84
	No trabajar entre los -3 y 10 °C	1 Desconectado	5	Al estar desconectado el termostato, el compresor no recibe la señal que necesita para trabajar, por lo que estará detendio permanentemente, sin trabajar el sistema de aire acondicionado	5	4	100
		2 Conexión permanente	4	El termostato trabaja constantemente, lo que gatilla que el compresor no resiva señal de temperatura optima y no deja de trabajar.	3	7	84

Desconectar el circuito del compresor	No desconecta el circuito eléctrico	1	Sensor desgastado	3	Incapaz de detectar la temperatura correcta del evaporador, por lo que el compresor seguirá trabajando sin parar.	4	5	60
		2	Sensor contaminado	4	El sensor esta obstruido con material externo, por lo que la temperatura que capta no es la correcta, dejando que el compresor trabaje sin parar.	3	7	84
		3	Conexión permanente	4	termostato trabaja constantemente, lo que gatilla que el compresor no resiva señal de temperatura optima y no deja de trabajar.	3	7	84

Tabla 17: MAFEC del termostato del aire acondicionado del camión 1. (Fuente propia)

Con el apoyo de las Tabla 37, Tabla 38 y Tabla 39, se calculó la severidad, ocurrencia y detectabilidad respectivamente para poder llegar al valor de RPN (Ecuación 15) y así tener una jerarquización según criticidad de las fallas. El RPN 112 resulto ser el más elevado, el cual es para el modo de falla conexión permanente, lo que ocasiona que el compresor no deje de trabajar por lo que la temperatura desciende considerablemente, lo que conlleva un problema para el operador y consecuentemente una parada del equipo.

5.2.1 Mejoras en el termostato.

Para obtener mejoras que se acerquen a la realidad operativa de los equipos y encontrar acciones que tengan el mejor impacto sobre las fallas descritas anteriormente, se le pide ayuda al mecánico especialista en aire acondicionado de área, quien fue un guía para poder proponer las siguientes mejoras.

El modo de falla desgastado, es ocasionado directamente con la vida útil del componente al igual que la conexión permanente. Esta última hace referencia a conectores internos del termostato, los cuales se separan al momento de que el refrigerante alcanza su temperatura programada, lo que gatilla la detención del compresor y luego se vuelven a juntar cuando la temperatura cambia, generando el aviso al compresor para que empiece nuevamente su trabajo. El cambiar estos conectores no es viable por el tiempo que se tomaría versus los costos que implica el cambio completo del termostato. Expuesto lo anterior, las mejoras propuestas para mitigar ambos modos de falla son:

- Agregar en la pauta de mantenimiento de 500 horas el cambio de termostato.

La contaminación del sensor es generada por las condiciones normales de trabajo y la desconexión por la misma vibración que experimenta el equipo por su trabajo cotidiano, por lo que las mejoras propuestas para este modo de falla son:

- Integrar en la pauta de 250 horas, limpieza total del compartimiento donde se encuentra el termostato.
- Integrar a la pauta de 250 horas, inspección del estado de conexión del termostato a la línea del aire acondicionado.

5.3 MAFEC Flexibles.

Los flexibles de la transmisión se encuentran a la intemperie por la parte inferior del camión, por lo que están en contacto con rocas, tierra y humedad, además de estar rozando con el chasis del equipo y entre los demás flexibles, por lo que es primordial buscar formas que minimicen los efectos adversos que traen estas condiciones, por lo cual se realiza un MAFEC para encontrar las mejoras oportunas y así aumentar los indicadores de confiabilidad y la disponibilidad del equipo, tal como muestra la Tabla 18, la cual fue creada con la ayuda de dos mecánicos especialistas y el líder de mantenimiento del área de mantenimiento:

Función	Falla Funcional	Modos de Falla	(O)	Efecto de los Fallos	(S)	(D)	RPN
Transportar aceite hidráulico	No transporta aceite hidráulico	1 Fuga en el flexible	4	Escape de aceite por medio de ruptura de la estructura del flexible	4	1	16
		2 Sello gastado	3	Escape de aceite debido a excesivo desgaste del sello	4	3	36
Conectar Bomba de aceite con válvulas	No conectar Bomba de aceite con válvulas	1 Corte	3	Ruptura transversal total del flexible	5	1	15
		2 Desconectado	3	Conexión a la bomba o válvulas defectuosa	4	2	24
Conectar válvulas con transmisión	No conectar válvulas con transmisión	1 Corte	3	Ruptura transversal total del flexible	5	1	15
		2 Desconectado	3	Conexión a la válvula o transmisión defectuosa	4	2	24

Tabla 18: MAFEC de los flexibles de la transmisión del camión 4. (Fuente propia)

Los índices de severidad, ocurrencia y detectabilidad se calcularon con el apoyo de las Tabla 37, Tabla 38 y Tabla 39 respectivamente, lo que conllevó a la obtención del valor RPN (Ecuación 15), el cual tiene como máximo el valor 36, que corresponde a sello gastado, esto ya que es una falla difícil de detectar, por lo que se deben proponer mejoras para minimizar este modo de falla.

5.3.1 Mejoras a los flexibles.

Con la ayuda de dos mecánicos especialistas y el líder de mantenimiento se buscaron las mejoras que más se apegan a la realidad de operativa que tienen los equipos, además de tener una aclaración de los tiempos que se demoran en realizar cada mejora, para poder proponer su intervención en el momento oportuno y con la frecuencia acorde.

Para mitigar las fugas y cortes en los flexibles las mejoras propuestas son:

- Instalar un recubrimiento de manguera o de goma al flexible, con el fin de que el roce generado afecte a este recubrimiento y no así a los flexibles, minimizando las posibilidades de corte.
- Implementar en la pauta de 250 horas inspecciones visuales de estos recubrimientos y bajo cualquier anomalía, realizar el cambio de este.

Para disminuir el escape de aceite debido a los sellos gastados:

- Implementar una base de datos del momento que fallo cada sello, para calcular el momento más oportuno de cambio. Ya que este cambio no es fácil ni rápido de hacer, por lo mismo no se deja fijo en alguna pauta de mantenimiento.

Las mejoras para el modo de falla desconectado son:

- Realizar inspección visual a las sujeciones de los flexibles cada 250 horas y tomar acciones al encontrar alguna anomalía.
- Cada vez que se deba cambiar un flexible, se deberá realizar junto al documento que detalle el punto de inicio de conexión hasta el punto final de conexión de cada flexible, verificando que dicha conexión se encuentra en el lugar que corresponda.

5.4 Propuesta de nuevas pautas de mantenimiento

Como se dijo anteriormente existen 4 tipos de pautas de mantenimiento para estos equipos en el área de mantenimiento mina de la empresa nortina, las cuales tienen diversas tareas que se le realizan a los sistemas de los equipos según su horómetro, en la Tabla 19 se realiza una comparación de las tareas que se le realizan a los sistemas en las pautas actuales y la pauta propuesta para las 250 horas:

Sistema	Pauta 250 hrs	
	Actual	Propuesta
	Tarea	Tarea
Motor	Cambiar aceite motor	Cambiar aceite motor
	Cambiar filtros de aceite motor	Cambiar filtros de aceite motor
	Cambiar filtros primarios de aire	Cambiar filtros primarios de aire
	Cambiar filtro primario de combustible	Cambiar filtro primario de combustible
	Cambiar filtro secundario de combustible	Cambiar filtro secundario de combustible
Eléctrico	Revisar alternador	Revisar alternador
	Revisar correa de alternador	Revisar correa de alternador
Aire Acondicionado	Revisar compresor	Revisar compresor
	Revisar correa de compresor	Revisar correa de compresor
		Revisión conexión líneas termostato
		Limpieza total compartimiento termostato
Transmisión	Revisar líneas	Revisar líneas
	Revisar soportes	Revisar soportes
	Revisar arnés	Revisar arnés
		Inspeccionar sujeción de flexibles
		Inspeccionar recubrimiento de flexibles
Diferencial - mando final	Revisar perno	Revisar perno
	Registrar presión 4 neumáticos	Registrar presión 4 neumáticos
	Revisar neumáticos y llantas	Revisar neumáticos y llantas
		Medir y registrar altura de surcos banda rodado
Up/drop box	Revisión general	Revisión general
Hidráulico	Revisión general	Revisión general
Chasis	Revisión general	Revisión general
Sistema supresor de incendio	Revisión general	Revisión general
Engrase	Revisión general	Revisión general

Tabla 19: Listado de las tareas actuales y propuestas para la pauta de 250 horas. (Fuente propia)

En el caso de la pauta de 500 horas, se realiza el mismo procedimiento:

Sistema	Pauta 500 hrs	
	Actual	Propuesta
	Tarea	Tarea
Motor	Cambiar aceite motor	Cambiar aceite motor
	Cambiar filtros de aceite motor	Cambiar filtros de aceite motor
	Cambiar filtros primarios de aire	Cambiar filtros primarios de aire
	Cambiar filtro primario de combustible	Cambiar filtro primario de combustible
	Cambiar filtro secundario de combustible	Cambiar filtro secundario de combustible
	Revisión general	Revisión general
Eléctrico	Revisar alternador	Revisar alternador
	Revisar correa de alternador	Revisar correa de alternador
Aire Acondicionado	Revisar compresor	Revisar compresor
	Revisar correa de compresor	Revisar correa de compresor
		Revisión conexión líneas termostato
		Limpieza total compartimiento termostato
		Cambiar termostato
Transmisión	Revisar líneas	Revisar líneas
	Revisar soportes	Revisar soportes
	Revisar arnés	Revisar arnés
	Cambiar respiradero	Cambiar respiradero
	Cambiar filtro aceite	Cambiar filtro aceite
	Tomar muestra de aceite	Tomar muestra de aceite
		Inspeccionar sujeción de flexibles
		Inspeccionar recubrimiento de flexibles
Diferencial - mando final	Revisar perno	Revisar perno
	Registrar presión 4 neumáticos	Registrar presión 4 neumáticos
	Revisar neumáticos y llantas	Revisar neumáticos y llantas
	Revisar nivel de aceite mandos finales	Revisar nivel de aceite mandos finales
	Revisar nivel de aceite diferenciales	Revisar nivel de aceite diferenciales
		Medir y registrar altura de surcos banda rodado
Up/drop box	Revisión general	Revisión general
Hidráulico	Revisión general	Revisión general
Chasis	Revisión general	Revisión general
Sistema supresor de incendio	Revisión general	Revisión general
Engrase	Revisión general	Revisión general

Tabla 20: Listado de las tareas actuales y propuestas para la pauta de 500 horas. (Fuente propia)

Se proponen dos pautas nuevas (250 y 500 horas), además de tareas por parte de operadores y seguimiento de fallas para tener proyección del cambio. Cabe destacar que en la Tabla 19 y Tabla 20, las tareas destacadas en amarillo son las nuevas tareas propuestas a incorporar a la pauta actual, la pauta de 500 horas contiene las tareas de la de 250 horas y se le agregan otras.

6 Costos asociados.

Cada mejora realizada tiene un costo asociado, el cual debe ser menor que a los costos implicados a la reparación por correctivo para que esta mejora sea rentable para el área de mantenimiento y la empresa.

Para mitigar o minimizar cada modo de falla analizado, se propuso una mejora o una implementación de tarea en alguna pauta de mantenimiento (250 o 500 horas), con el fin de tener control de las fallas y así poder aumentar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos, cabe destacar que el análisis fue realizado particularmente para el camión 1 y 4, sin embargo las mejoras y propuestas de pautas se aplican para toda la flota de camiones MT-65.

Para el área de mantenimiento es importante el tener equipos operativos al menor costo posible, por lo que se debe tener en cuenta cuanto es el gasto que se tiene al implementar mejoras y tareas a las pautas para así comparar con lo que se tenía y tomar la decisión definitiva de tomar en cuenta dichas mejoras, es por lo mismo que en la Tabla 21 se muestra el costo actual versus el costo propuesto para la pauta de 250 horas:

	Pauta 250 horas	
	Costo actual USD\$	Costo propuesta USD\$
Filtros	1.287	1.287
Aceite	124,87	124,87
Revisión y limpieza	-	0
Total	1.412	1.412

Tabla 21: Costos de la pauta de 250 horas actual y propuesta. (Fuente propia)

Como se puede observar en la Tabla 21, los costos de ambas pautas son los mismos, ya que en dicha pauta las incorporaciones propuestas son solo revisiones y limpieza, lo cual no tiene costo asociado, ya que la empresa cuenta con mecánicos propios a su servicio, por lo que solo se registran costos de repuestos e insumos.

Para la propuesta de la pauta de 500 horas se tiene la siguiente comparación:

	Pauta 500 horas	
	Costo actual USD\$	Costo propuesta USD\$
Filtros	2.445	1.287
Aceite	124,87	124,87
Revisión y limpieza	0	0
Termostato	-	270,14
Total	1.412	1.682

Tabla 22: Costos de la pauta de 500 horas actual y propuesta. (Fuente propia)

En la pauta de 500 horas propuestas y a diferencia de la de 250 horas, se realiza el cambio de un componente que sería el termostato cuyo costo es de US\$270.14 (repuesto original), por lo que esa es la diferencia entre ambas pautas.

Sin embargo no solo se proponen pautas nuevas, sino que mejoras aisladas, las cuales se detallan en la Tabla 23 con su valor correspondiente:

	Valor	
Manómetros Neumáticos	3,45	USD\$/unidad
Estación inflado	0	-
Recubrimiento flexibles	75	USD\$

Tabla 23: Gastos por implementar mejoras. (Fuente propia)

Los manómetros para neumáticos serán dejados en los camiones, por lo que se deben compara 20 unidades, la estación de inflado ya se encuentra instalada en la empresa, por lo que su costo como mejora es nula y el recubrimiento de los flexibles tienen un largo total de 10 metros por camión.

Conclusiones.

El mejorar los índices de confiabilidad y modificar las pautas de mantenimiento para que la flota de 20 camiones tenga una mejor repercusión en los beneficios productivos de la empresa minera, se hace primordial para el área de mantenimiento mina.

Al poder realizar un estudio de los índices que obtuvieron esta flota durante el 2018 (año que empezaron a ingresar a la empresa estos equipos), se puede verificar que los camiones que están por debajo de lo esperado son el 1 y el 4, por lo que se hace necesario un estudio de confiabilidad de estos equipos. Además de tener una base de datos que contenga la variabilidad de estos, ya que al tener estos datos, se pueden tomar medidas acorde a cada caso y no generalizar.

Al recopilar los datos de paradas por fallas que experimentaron ambos equipos desde que empezaron a trabajar en las minas subterráneas, se puede verificar que por medio de un análisis de distribución weibull, su confiabilidad es muy baja y su tasa de falla aumenta significativamente al pasar las horas en operaciones (lo cual indica el que se deben reforzar los mantenimientos programados y fortalecer los mantenimientos predictivos), por lo que son dos aspectos que se deben abordar con mejoras oportunas para que estos índices y la disponibilidad mejoren considerablemente.

Por medio de análisis de Jack – Knife se pueden encontrar los componentes que afectan tanto a la disponibilidad, como a la confiabilidad y así solo centrarse en estos para mejorar los índices. En particular para el camión 1, los componentes que perturban los índice antes descritos son los neumáticos y el termostato del aire acondicionado, los cuales son primordiales para el correcto y eficiente trabajo, donde el primero ayuda a trasladar el camión de un lado a otro y el segundo a que el trabajo del operador dentro del equipo sea más agradable y ameno, pudiendo ejercer su labor con mejor ánimo. Para el camión 4, los flexibles de la transmisión son los que afectan a los índices, este componente al fallar trae complicaciones de suciedad y efectos secundarios con los mecanismos internos, al fugarse el aceite.

Para encontrar las mejoras correctas para minimizar o mitigar las fallas que sufren los componentes antes descritos, se realiza un MAFEC para cada componente, del cual se encontraron mejoras que van desde simples inspecciones a cambio del componente, también la integración de políticas de mantenimiento predictiva, las cuales tienen gastos asociados.

Algunas de las mejoras recomendadas se integrarán a los planes de mantenimiento preventivo, y otras se integrarán a un plan de mantenimiento predictivo, por lo que se respeta a lo que dicta la teoría; que al tener una tasa de falla creciente, por ende, encontrarse en la etapa de desgaste (Ilustración 3), sea hace necesario el reforzar los mantenimientos programados y fortalecer los mantenimientos predictivos.

Para los neumáticos, los gastos asociados a las mejoras propuestas ascienden a solo USD \$3.45 por camión, que viene siendo un gasto de compra de manómetros, las demás

mejoras son recomendaciones para el área de operaciones minas y la estación de inflado de neumáticos, la cual ya está instalada en la empresa.

En cuanto al termostato del aire acondicionado, la mejora que conlleva un costo asociado es el cambio de este componente en la pauta de 500 horas, el cual asciende a USD \$270.14 la unidad y las demás mejoras son el limpiado e inspecciones de las instalaciones cada 250 horas.

Para los flexibles se tienen gastos para implementar refuerzos a estos con mangueras comprados que equivale a un costo total de USD \$75 por 10 metros de manquera por camión y las demás son la incorporación de un mantenimiento predictivo para los sellos e inspecciones para el apreté de los flexibles.

Finalmente se propusieron varias mejoras que intervienen a las pautas de mantenimiento actuales y la incorporación de políticas que no se están usando en estos momentos por el área, las cuales serán capaces de mejorar los índices de confiabilidad de los equipos. Sin embargo, todas estas mejoras, se pueden perfeccionar al tener una base de datos con la variabilidad de los mismos, ya que se pueden tomar en cuenta por ejemplo las demografías y tener mejoras en particular para cada acción que tengan los camiones, esto como recomendación para el área de mantenimiento mina, ya que el parámetro promedio es muy general y no da información relevante del que pasó entre los valores obtenidos.

Referencias

- Arata Andreani, A. (2009). *Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales. Aplicación de la plataforma R-MES*. Santiago : RIL, editores.
- Arata, A. (2005). *Manual de gestión de activos y mantenimiento*. Santiago: RIL editores.

- Artigas, O. D. (15 de Enero de 2020). FMECA. Copiapó, Copiapó, Atacama.
- Campbell, J. R.-P. (2016). *Uptime*. New York : Productivity Press.
- Comision Chilena del Cobre. (2014). *Monitoreo de la pequeña y mediana minería chilena*. Santiago: Dirección de Estudios y Políticas Públicas.
- Dhillon, B. (2017). *Engineering Systems Reliability, Safety, and Maintenance*. Boca Raton : CRC Press.
- esacademi.com. (22 de Marzo de 2020). *esacademi.com*. Obtenido de esacademi.com: <https://esacademic.com/dic.nsf/eswiki/322029>
- Heizer, J. (2008). *Dirección de la producción y de operaciones, Decisiones tácticas* . Madrid: PEARSON EDUCACIÓN S.A.
- JA1012, N. S. (2002). Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC). *Prácticas recomendadas Para Vehículos Aeroespaciales y de Superficie*. Ginebra, Suiza: ISO estándar.
- Knights, P. F. (2001). Rethinking Pareto analysis: maintenance applications of logarithmic scatterplots. En *Journal of Quality in Maintenance Engineering* (págs. 252-263).
- Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance*. Elsevier.
- Pascual, R. (2007). *El Arte de Mantener*. Santiago.
- Pistarelli, A. (2010). *Manual de Mantenimiento: Ingeniería, Gestión, Organización*. Buenos Aires: Sophie le Conte.
- RAE. (30 de Julio de 2019). *Real Academia Española*. Obtenido de Real Academia Española web site: <https://dle.rae.es/?id=OH9tS8F>
- Reliabilityweb.com. (15 de Enero de 2020). *Reliabilityweb.com*. Obtenido de <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/calculo-de-los-parametros-de-la-distribucion-de-weibull/>
- Salamanca, E. (2018). *Apuntes de Manenimiento Predictivo*. Santiago.
- Tinga, T. (2013). *Principles of loads and failure mechanisms: applications in maintenance, reliability and design*. Springer Science & Business Media.
- Torres, L. (2016). *Gestión Integral de Activos Físicos y Mantenimiento*. Alfaomega Grupo Editor Argentino S.A.

Anexos

Anexo A: Datos.

SISTEMA	SUBSISTEMA	COMPONENTE
MOTOR	ADMISION Y ESCAPE	AFTERCOOLER
		FILTRO AIRE PRIMARIO
		FILTRO AIRE SECUNDARIO
		INDICADOR SATURACIÓN FILTRO
		PORTA FILTRO DE AIRE
		SENSOR DE PRESIÓN BAROMÉTRICA
		SENSOR DE PRESIÓN DE TURBO
		SENSOR DE TEMPERATURA DE ADMISIÓN
		SILENCIADOR
		TUBERIA LINEA DE ADMISION
		TUBERIA LINEA DE ESCAPE
		TURBO ALIMENTADOR
	DISTRIBUCIÓN	CORREA ALTERNADOR
		GUARDA CORREA
		POLEA
	ELECTRONICO	FIJACIÓN HARNES
		HARNES
		MODULO DE CONTROL
		SENSOR
	LUBRICACION	ACEITE MOTOR
		BASE FILTRO DE ACEITE
		BOMBA DE ACEITE
		CARTER
		EMPAQUETADURA CARTER
		ENFRIADOR ACEITE MOTOR
		FILTRO DE ACEITE
		LINEAS DE LUBRICACION
		RESPIRADERO MOTOR
		SENSOR DE PRESIÓN DE ACEITE
		SENSOR DE TEMPERATURA DE ACEITE
		VARILLA MEDIDORA DE ACEITE
	MOTOR BÁSICO	BLOCK
		CONJUNTO BALANCIN
		CULATA
		EMPAQUETADURAS
		TAPA, CUBIERTA
		VALVULAS
	REFRIGERACION	ASPA VENTILADOR

		BOMBA DE AGUA
		ESTANQUE DE EXPANSION
		FILTRO REFRIGERANTE MOTOR
		LINEAS DE REFRIGERACION
		MOTOR HIDRÁULICO
		PROTECCION VENTILADOR
		RADIADOR
		REFRIGERANTE
		SENSOR DE TEMPERATURA REFRIGERANTE
		TAPA DEPOSITO ESTANQUE
		TERMOSTATO
	SISTEMA INYECCIÓN	BOMBA ALTA PRESIÓN
		BOMBA TRANSFERENCIA COMBUSTIBLE
		ESTANQUE COMBUSTIBLE
		FILTRO COMBUSTIBLE
		FILTRO COMBUSTIBLE DECANTADOR PRIMARIO
		INYECTOR
		LINEAS DE COMBUSTIBLE
		PORTA FILTRO COMBUSTIBLE
		TAPA DE COMBUSTIBLE
TREN DE POTENCIA	DIFERENCIAL DELANTERO	ACEITE DIFERENCIAL DELANTERO
		BUJES PASADORES
		FLEXIBLES, CONECCIONES Y FIJACIONES
		RESPIRADERO
	DIFERENCIAL TRASERO	ACEITE DIFERENCIAL TRASERO
		FLEXIBLES, CONECCIONES Y FIJACIONES
		RESPIRADERO
	LINEA CARDÁNICA	CARDAN DELANTERO
		CARDAN INTERMEDIO LADO DIF TRASERO
		CARDAN INTERMEDIO LADO TRANSMISION
		CARDAN SUPERIOR
		CARDAN TRASERO
		CRUCETA, PERNO CRUCETA
		PILLOW BLOCK
	MANDO FINAL	ACEITE MANDO FINAL
		COMPONENTES INTERNOS MANDO FINAL
		FLEXIBLES, CONECCIONES Y FIJACIONES
		TAPON
	NEUMÁTICO	LLANTA
		NEUMÁTICO
		PERNO RUEDA

		SENSOR DE MONITOREO
	TRANSMISION	ACEITE TRANSMISIÓN CONJUNTO VÁLVULAS DROPBOX ENFRIADOR FIJACION, ANCLAJE FILTRO DROPBOX FILTRO UPBOX FLEXIBLES LOCK UP RESPIRADERO RETARDADOR SOPORTE DE TRANSMISION UPBOX VARILLA DE NIVEL
HIDRAULICO	FRENO	ACUMULADOR BOMBA DE FRENO CONJUNTO FRENO ENFRIADOR FILTRO HIDRAULICO FILTRO HIDRAULICO ENFRIAMIENTO FLEXIBLES, CONECCIONES Y FIJACIONES FRENO ESTACIONAMIENTO PEDAL DE FRENO VALVULA
	SISTEMA DE DIRECCION	BANCADAS BOMBA DIRECCIÓN BUJES PASADORES CILINDRO DIRECCIÓN FILTRO FLEXIBLES, CONECCIONES Y FIJACIONES HARNES ORBITROL VALVULAS DE CONTROL VOLANTE
	SISTEMA HIDRÁULICO	ACEITE HIDRÁULICO BLOCK BOMBA CILINDRO LEVANTE ENFRIADOR ESTANQUE HIDRAULICO

CHASIS	ARTICULACIÓN CENTRAL	FILTRO HIDRAULICO
		FLEXIBLES, CONECCIONES Y FIJACIONES
		RESPIRADERO
		VALVULA CHECK
		VALVULA DE SEGURIDAD
		VALVULAS DE CONTROL
	CHASIS	ARTICULACIÓN
		BANCADAS
		BARRA DIRECCIÓN
		BUJES PASADORES
		CAPOT
		PASA MANO
		PISADERA
		PROTECCION DE BATERIAS
		PROTECCIONES
		REJILLAS
		SOPORTE FOCO
		SOPORTES
		TAPA BARRO
	IMPLEMENTO	TOLVA
	SISTEMA DE SUSPENSION	ACUMULADOR
		BANCADAS
		BARRA DE TORSION
		BARRA RECTA
		BUJES PASADORES
		CILINDRO DE SUSPENSION
	SUPRESOR INCENDIO	BATERIAS
		BOQUILLA
		ESTANQUE SUPRESOR INCENDIO
		EXTINTOR MANUAL
		FLEXIBLES, CONECCIONES Y FIJACIONES
		HARNES
		MODULO DE CONTROL
		PERCUTOR
		PULSADOR
		SONDA DE MONITOREO
CABINA	AIRE ACONDICIONADO	COMPRESOR
		CONDENSADOR
		CORREA A/C
		DIFUSOR DE AIRE
		ELECTROVENTILADOR

		EVAPORADOR
		FILTRO POLEN
		FILTRO SECADOR
		LINEA DE ALIMENTACION
		PRESURIZADOR
		TERMOSTATO
	ASIENTO	AMORTIGUADOR
		ASIENTO
		CINTURON DE SEGURIDAD
	CABINA	ESPEJO
		MANILLA, CHAPA
		PARABRISAS
		PUERTA
		SELLADO (HERMETICIDAD)
		VIDRIOS
	INSTRUMENTOS	ANTENA
		HOROMETRO
		INDICADORES
		JOYSTICK
		MANOMETRO
		MONITOR
		PESOMETRO
		RADIO
		RCS
		TABLERO
	LIMPIA PARABRISAS	BRAZO
		DEPÓSITO
		MOTOR
		PLUMILLAS
ELECTRICO	ELECTRICO	ALARMA DE RETROCESO
		ALTERNADOR
		BALIZA
		BATERIAS
		BOCINA
		CABLE CAN
		CAJA DE FUSIBLES
		CAMARA DE RETROCESO
		CAMARA DE TOLVA
		CAMARA LATERAL
		CELDA DE CARGA
		CORTA CORRIENTE

		FUSIBLE
		HARNES
		INTERRUPTOR
		INTERRUPTOR RCS
		MODULO DECODIFICADOR
		MODULO IO
		MOTOR ARRANQUE
		RELE
		SENSOR
		SENSOR PRESION
		SENSOR TEMPERATURA
		SOLENOIDE
		SWICH DE CONTACTO
	ILUMINACION	FOCO FAENERO
		FOCOS DELANTEROS
		FOCOS TRASEROS
		INTERMITENTE
		LUZ FRENO
		LUZ INTERIOR
		SEMAFORO DE ESTADO
ENGRASE CENTRALIZADO	SISTEMA ENGRASE	BLOCK
		BOMBA GRASA
		DEPOSITO
		FLEXIBLES, CONECCIONES Y FIJACIONES
		GRASERA

Tabla 24: Desglose del camión MT-65. (Fuente propia)

FECHA	HRS OP	HRS F/S	MOTIVO	TIPO
26-ene	4	6,33	ELECTRICO,ELECTRICO,CABLE	C
27-ene	9	9,00	ELECTRICO,ELECTRICO,SENSOR PRESION	C
28-ene	13	4,00	ELECTRICO,ELECTRICO,FUSIBLE	C
29-ene	8	4,17	TREN DE POTENCIA,DIFERENCIAL TRASERO,ACEITE DIFERENCIAL TRASERO	C
30-ene	15	4,83	TREN DE POTENCIA,DIFERENCIAL DELANTERO	C
31-ene	12	9,33	HIDRAULICO,FRENO	C
01-feb	16	3,50	CHASIS,CHASIS,TOLVA	C
04-feb	46	1,00	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
05-feb	5	10,00	CABINA,AIRE ACONDICIONADO,TERMOSTATO	C
06-feb	5	6,50	CHASIS,CHASIS,TOLVA	C
07-feb	5	8,67	CABINA,AIRE ACONDICIONADO,TERMOSTATO	C
08-feb	7	9,33	CABINA,AIRE ACONDICIONADO,TERMOSTATO	C
10-feb	31	0,33	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C

11-feb	8	2,50	CABINA,AIRE ACONDICIONADO,FILTRO SECADOR	C
12-feb	9	11,33	PREVENTIVA	P
18-feb	23	3,00	CABINA,AIRE ACONDICIONADO,COMPRESOR	C
01-mar	1	12,67	MOTOR,LUBRICACION,ACEITE MOTOR	C
01-abr	9	12,17	PREVENTIVA	P
04-mar	8	5,00	CABINA,AIRE ACONDICIONADO,TERMOSTATO	C
07-mar	11	5,50	CABINA,AIRE ACONDICIONADO,VALVULA DE EXPANSION	C
10-mar	3	17,33	HIDRAULICO,SISTEMA HIDRAULICO,FLEXIBLES, CONECCIONES Y FIJACIONES	C
11-mar	10	13,17	MOTOR,LUBRICACION,LINEAS DE LUBRICACION	C
12-mar	15	1,83	MOTOR,LUBRICACION,ACEITE MOTOR	C
13-mar	2	8,00	PREVENTIVA	P
29-mar	16	6,50	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#01-2-3-4	C
30-mar	16	3,67	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#01-2-3-4	C
31-mar	19	2,50	ELECTRICO,ELECTRICO,SWICH DE CONTACTO	C
09-abr	41	20,83	PREVENTIVA	P
10-abr	15	2,50	HIDRAULICO,SISTEMA HIDRAULICO,FLEXIBLES, CONECCIONES Y FIJACIONES	C
14-abr	33	0,83	PREVENTIVA	P
21-abr	9	12,00	PREVENTIVA	P
23-abr	26	0,50	CHASIS,SUPRESOR INCENDIO,ANSUL-AFEX	C
24-abr	18	0,83	ELECTRICO,ELECTRICO,SENSOR	C
26-abr	34	1,67	ELECTRICO,ELECTRICO,SENSOR PRESION	C
29-abr	42	24,17	PREVENTIVA	P
01-may	10	1,00	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
02-may	18	3,33	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
03-may	8	13,83	CABINA,INSTRUMENTOS,RADIO	C
04-may	5	9,00	ELECTRICO,ELECTRICO,SENSOR PRESION	C
05-may	7	36,67	PREVENTIVA	P
07-may	9	7,33	PREVENTIVA	P
09-may	15	0,67	CHASIS,SUPRESOR INCENDIO,PULSADOR	C
10-may	17	1,50	CABINA,INSTRUMENTOS	C
11-may	16	1,00	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
12-may	15	3,50	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
12-jul	8	7,00	ELECTRICO,ELECTRICO,SENSOR	C
13-jul	18	1,17	CABINA,ASIENTO,CINTURON DE SEGURIDAD	C
14-jul	17	0,33	CABINA,CABINA,ESPEJO	C
15-jul	15	6,17	PREVENTIVA	P
16-jul	16	3,67	CHASIS,SISTEMA DE SUSPENSION,ACUMULADOR	C
19-jul	46	9,17	MOTOR,SITEMA INYECCION,LINEAS DE COMBUSTIBLE	C
20-jul	3	20,00	PREVENTIVA	P
22-jul	38	0,50	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE	C

24-jul	7	12,67	MOTOR,ADMISION Y ESCAPE, SENSOR PRESION TURBO	C
25-jul	8	0,50	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE	C
28-jul	24	1,00	CABINA,CABINA,ESPEJO	C
30-jul	18	8,50	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO	C
31-jul	18	0,33	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
02-ago	18	1,83	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#04	C
05-ago	55	1,33	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
06-ago	18	0,50	HIDRAULICO,SISTEMA HIDRAULICO,ACEITE HIDRAULICO	C
08-ago	16	1,50	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#02	C
09-ago	14	55,67	PREVENTIVA	P
14-ago	7	12,00	HIDRAULICO,SISTEMA DE DIRECCION,FLEXIBLES, CONECCIONES Y FIJACIONES	C
16-ago	29	48,00	PREVENTIVA	P
19-ago	8	12,00	CHASIS,SISTEMA DE SUSPENSION,ACUMULADOR	C
30-ago	12	1,00	CABINA,CABINA,SOPORTE CABINA	C
31-ago	18	0,33	TREN DE POTENCIA,TRANSMISION,FILTRO ACEITE TRANSMISION	C
10-sep	8	13,50	CHASIS,SISTEMA DE SUSPENSION,ACUMULADOR	C
22-sep	10	12,00	HIDRAULICO,FRENO,ENFRIADOR	C
23-sep	16	1,67	CABINA,ASIENTO,ASIENTO	C
24-sep	16	7,17	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
25-sep	5	1,50	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#01	C
28-sep	9	8,00	TREN DE POTENCIA,LINEA CARDANICA, CARDAN	C
30-sep	9	12,00	PREVENTIVA	P
01-oct	18	0,50	CHASIS,SISTEMA DE SUSPENSION	C
03-oct	18	1,67	CABINA,LIMPIA PARABRISAS	C
05-oct	10	17,50	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#01-2-3-4	C
09-oct	5	8,00	MOTOR,ELECTRONICO,HARNES	C
11-oct	28	12,00	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
12-oct	7	6,33	CHASIS,SUPRESOR INCENDIO,PULSADOR	C
14-oct	34	5,50	HIDRAULICO,SISTEMA HIDRAULICO,FLEXIBLES, CONECCIONES Y FIJACIONES	C
20-oct	100	59,17	PREVENTIVA	P
24-oct	6	12,00	PREVENTIVA	P
25-oct	13	1,50	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
26-oct	10	6,17	ELECTRICO,ELECTRICO,SENSOR PRESION	C
27-oct	15	0,17	PREVENTIVA	P
28-oct	16	0,33	CHASIS,SUPRESOR INCENDIO,EXTINTOR	C
29-oct	11	8,50	CABINA,AIRE ACONDICIONADO,TERMOSTATO	C
30-oct	2	9,50	ELECTRICO,ELECTRICO,SENSOR PRESION	C
31-oct	2	17,00	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#03-4	C
01-nov	11	9,33	CABINA,AIRE ACONDICIONADO,LINEA DE ALIMENTACION	C
03-nov	40	0,67	ELECTRICO,ELECTRICO,RELE	C

04-nov	4	0,83	MOTOR,ADMISION Y ESCAPE,TUBERIA LINEA DE ESCAPE	C
07-nov	20	12,00	CABINA,AIRE ACONDICIONADO,TERMOSTATO	C
08-nov	9	91,67	PREVENTIVA	P
13-nov	6	12,00	TREN DE POTENCIA,LINEA CARDANICA,CARDAN	C
14-nov	11	3,00	CABINA,AIRE ACONDICIONADO,COMPRESOR	C
17-nov	4	10,00	ELECTRICO,ELECTRICO,SENSOR PRESION	C
20-nov	28	6,00	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
02-dic	4	6,33	CHASIS,CHASIS,TOLVA	C
03-dic	3	4,60	CABINA,AIRE ACONDICIONADO,COMPRESOR	C
04-dic	11,8	12,50	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#02	C
07-dic	12	5,00	TREN DE POTENCIA,TRANSMISION,ACEITE TRANSMISIÓN	C
10-dic	28	5,00	MOTOR,REFRIGERACION,RADIADOR	C
12-dic	11	1,17	CABINA,AIRE ACONDICIONADO,EVAPORADOR	C
14-dic	23	0,50	CABINA,CABINA,ESPEJO	C
15-dic	6	1,00	CABINA,CABINA,ESPEJO	C
16-dic	18	3,33	PREVENTIVA	P
19-dic	32	1,67	ELECTRICO,ILUMINACION,FOCO TRASERO	C
23-dic	70	1,50	TREN DE POTENCIA,TRANSMISION,ACEITE TRANSMISIÓN	C
24-dic	6	1,33	ELECTRICO,ILUMINACION,FOCO FAENERO	C
31-dic	4	12,50	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#02	C

Tabla 25: Datos de paradas del CAMMT65001 para el 2018. (Fuente propia)

FECHA	HRS OP	HRS F/S	MOTIVO	TIPO
14-feb	29	5,50	CHASIS,IMPLEMENTO,TOLVA	C
16-feb	31	1,00	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#01-2-3-4	C
18-feb	38	1,50	PREVENTIVA	P
22-feb	45	1,00	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
26-feb	75	1,33	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
02-mar	26	12,00	MOTOR,ADMISION Y ESCAPE,SILENCIADOR	C
03-mar	17	1,00	CABINA,AIRE ACONDICIONADO,COMPRESOR	C
04-mar	18	0,33	CABINA,INSTRUMENTOS	C
06-mar	25	4,00	TREN DE POTENCIA,TRANSMISION,FLEXIBLES	C
09-mar	50	0,67	CHASIS,IMPLEMENTO,TOLVA	C
11-mar	30	1,33	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
13-mar	29	0,33	CHASIS,IMPLEMENTO,TOLVA	C
14-mar	8	5,83	HIDRAULICO,SISTEMA HIDRAULICO,BLOCK	C
15-mar	5	10,83	TREN DE POTENCIA,TRANSMISION,FLEXIBLES	C
17-mar	35	1,00	TREN DE POTENCIA,TRANSMISION,FLEXIBLES	C
18-mar	7	14,33	PREVENTIVA	P
20-mar	24	16,00	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#01	C
21-mar	14	6,33	TREN DE POTENCIA,TRANSMISION,FLEXIBLES	C
23-mar	32	2,17	PREVENTIVA	P

27-mar	12	9,67	ELECTRICO,ILUMINACION,FOCOS TRASEROS	C
29-mar	35	5,33	HIDRAULICO,SISTEMA HIDRAULICO,FLEXIBLES, CONECCIONES Y FIJACIONES	C
30-mar	16	2,00	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
31-mar	19	1,17	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
02-abr	29	5,33	HIDRAULICO,SISTEMA HIDRAULICO,BLOCK	C
03-abr	15	3,50	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#02	C
04-abr	17	1,17	TREN DE POTENCIA,TRANSMISION,FLEXIBLES	C
05-abr	7	7,00	PREVENTIVA	P
07-abr	27	6,33	MOTOR,LUBRICACION,ACEITE MOTOR	C
09-abr	38	2,83	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
10-abr	13	4,00	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
11-abr	11	8,00	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#01	C
12-abr	4	11,83	TREN DE POTENCIA,TRANSMISION,FLEXIBLES	C
14-abr	17	2,83	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
15-abr	18	1,00	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO	C
17-abr	31	2,00	CHASIS,SUPRESOR INCENDIO,EXTINTOR MANUAL	C
18-abr	14	4,67	TREN DE POTENCIA,TRANSMISION,FLEXIBLES	C
21-may	8	12,67	ELECTRICO,ELECTRICO,SENSOR	C
23-may	18	0,50	CABINA,INSTRUMENTOS	C
24-may	18	1,00	PREVENTIVA	P
25-may	7	6,50	ELECTRICO,ELECTRICO,CABLE	C
26-may	5	6,00	MOTOR,LUBRICACION,ACEITE MOTOR	C
28-may	13	9,17	CABINA,INSTRUMENTOS, RADIO	C
31-may	34	24,50	PREVENTIVA	P
02-jun	12	8,83	MOTOR,SITEMA INYECCION,FILTRO COMBUSTIBLE DECANTADOR PRIMARIO	C
03-jun	14	7,00	CABINA,CABINA,ESPEJO	C
04-jun	12	6,83	TREN DE POTENCIA,TRANSMISION,FLEXIBLES	C
05-jun	19	0,50	TREN DE POTENCIA,TRANSMISION,FLEXIBLES	C
07-jun	23	13,00	PREVENTIVA	P
08-jun	19	0,17	CABINA,INSTRUMENTOS	C
10-jun	34	1,00	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#01-2-3-4	C
11-jun	19	1,33	MOTOR,REFRIGERACION,RADIADOR	C
14-jun	54	18,00	TREN DE POTENCIA,LINEA CARDANICA,CARDAN TRASERO	C
17-jun	9	13,67	PREVENTIVA	P
18-jun	6	9,83	HIDRAULICO,SISTEMA HIDRAULICO,VALVULAS DE CONTROL	C
19-jun	24	7,33	TREN DE POTENCIA,TRANSMISION,TRANSMISION	C
20-jun	15	1,33	PREVENTIVA	P
21-jun	17	0,50	CABINA,CABINA,ESPEJO	C
23-jun	33	24,50	PREVENTIVA	P
25-jun	18	1,00	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C

28-jun	17	0,83	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE	C
29-jun	19	1,00	CHASIS,SUPRESOR INCENDIO,EXTINTOR MANUAL	C
30-jun	17	1,50	PREVENTIVA	P
01-jul	15	18,67	PREVENTIVA	P
02-jul	12	5,50	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
03-jul	18	0,83	PREVENTIVA	P
04-jul	16	1,17	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
08-jul	62	0,17	PREVENTIVA	P
09-jul	20	1,00	TREN DE POTENCIA,DIFERENCIAL TRASERO,ACEITE DIFERENCIAL TRASERO	C
10-oct	9	12,00	CABINA,AIRE ACONDICIONADO,EVAPORADOR	C
11-oct	6	10,00	HIDRAULICO,SISTEMA DE DIRECCION	C
12-oct	3	12,00	CHASIS,SUPRESOR INCENDIO,ESTANQUE SUPRESOR INCENDIO	C
13-oct	13	0,67	CHASIS,SISTEMA DE SUSPENSION	C
14-oct	18	0,33	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
15-oct	2	5,17	CABINA,AIRE ACONDICIONADO,COMPRESOR	C
16-oct	8	2,50	MOTOR,LUBRICACION,FILTRO DE ACEITE	C
18-oct	38	0,33	CABINA,CABINA,ESPEJO	C
19-oct	19	0,33	HIDRAULICO,SISTEMA DE DIRECCION	C
20-oct	17	1,50	ELECTRICO,ELECTRICO,CAMARA DE RETROCESO	C
22-oct	19	0,67	MOTOR,ADMISION Y ESCAPE,FILTRO AIRE PRIMARIO	C
23-oct	19	0,50	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
24-oct	18	1,00	PREVENTIVA	P
26-oct	17	0,67	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#01-2-3-4	C
27-oct	19	0,50	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#04	C
28-oct	2	36,67	PREVENTIVA	P
30-oct	8	6,17	CABINA,CABINA,PUERTA	C
02-nov	20	0,67	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#01	C
05-nov	19	0,83	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#02	C
08-nov	10	6,40	ELECTRICO,ELECTRICO,CAMARA DE RETROCESO	C
10-nov	6	14,33	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#03	C
11-nov	10	9,67	PREVENTIVA	P
15-nov	9	12,00	HIDRAULICO,FRENO,ENFRIADOR	C
16-nov	10	12,17	PREVENTIVA	P
19-nov	45	5,17	TREN DE POTENCIA,TRANSMISION,TRANSMISION,SENSOR DE CONVERTIDOR	C
20-nov	19	1,67	ELECTRICO,ELECTRICO,CAMARA DE RETROCESO	C
21-nov	9	9,17	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#01-2	C
22-nov	20	0,33	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#01-2	C
26-nov	53	6,00	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
28-nov	19	20,00	PREVENTIVA	P
30-nov	25	4,17	MOTOR,SITEMA INYECCION,LINEAS DE COMBUSTIBLE	C

03-dic	55	5,50	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
04-dic	16	1,50	HIDRAULICO,SISTEMA HIDRAULICO,BLOCK	C
05-dic	19	0,83	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#01-2-3-4	C
07-dic	20	4,50	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
08-dic	5	8,00	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#04	C
10-dic	18	0,33	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#03-4	C
11-dic	14	5,40	ELECTRICO,ELECTRICO,CABLE	C
13-dic	30	1,83	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE	C
14-dic	21	12,17	PREVENTIVA	P
16-dic	5	8,00	CABINA,LIMPIA PARABRISAS	C
20-dic	66	1,67	MOTOR,ADMISION Y ESCAPE,FILTRO AIRE PRIMARIO	C
21-dic	15	0,67	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C
26-dic	69	7,00	TREN DE POTENCIA,NEUMATICO,NEUMATICO P#01	C
29-dic	60	1,00	ENGRASE CENTRALIZADO,SISTEMA ENGRASE,DEPOSITO	C

Tabla 26: Datos de paradas del CAMMT65004 para el 2018. (Fuente propia)

Anexo B: Parámetros Weibull

Tipo	Tiempos de funcionamiento entre eventos hrs	Ranking global de eventos Kj	Ranking inicial de fallas	Ranking ajustado de fallas rj [Ecuación 9]
C	1	1	1	1,0
P	2	2		
C	2	3	2	2,0
C	2	4	3	3,0
C	3	5	4	4,0
P	3	6		
C	3	7	5	5,0
C	4	8	6	6,1
C	4	9	7	7,1
C	4	10	8	8,1
C	4	11	9	9,1
C	4	12	10	10,1
C	5	13	11	11,2
C	5	14	12	12,2
C	5	15	13	13,2
C	5	16	14	14,2
C	5	17	15	15,2
C	5	18	16	16,2
P	6	19		

C	6	20	17	17,3
C	6	21	18	18,3
C	6	22	19	19,3
C	7	23	20	20,4
P	7	24		
C	7	25	22	21,4
C	7	26	23	22,4
C	7	27	24	23,5
C	8	28	25	24,5
C	8	29	26	25,6
C	8	30	27	26,6
C	8	31	28	27,6
C	8	32	29	28,7
C	8	33	30	29,7
C	8	34	31	30,8
C	8	35	32	31,8
C	9	36	33	32,8
P	9	37		
P	9	38		
P	9	39		
P	9	40		
C	9	41	34	33,9
P	9	42		
P	9	43		
C	10	44	35	35,1
C	10	45	36	36,2
C	10	46	37	37,3
C	10	47	38	38,5
C	10	48	39	39,6
C	11	49	40	40,7
C	11	50	41	41,8
C	11	51	42	43,0
C	11	52	43	44,1
C	11	53	44	45,2
C	11,8	54	45	46,3
C	12	55	46	47,5
C	12	56	47	48,6
C	12	57	48	49,7
C	13	58	49	50,9
C	13	59	50	52,0
P	14	60		
C	15	61	51	53,1
C	15	62	52	54,3
C	15	63	53	55,4
C	15	64	54	56,6
C	15	65	55	57,7

P	15	66		
P	15	67		
C	16	68	56	58,9
C	16	69	57	60,1
C	16	70	58	61,3
C	16	71	59	62,5
C	16	72	60	63,7
C	16	73	61	64,9
C	16	74	62	66,1
C	16	75	63	67,3
C	16	76	64	68,5
C	17	77	65	69,7
C	17	78	66	70,9
C	18	79	67	72,1
C	18	80	68	73,3
C	18	81	69	74,5
C	18	82	70	75,7
C	18	83	71	76,9
C	18	84	72	78,1
C	18	85	73	79,3
C	18	86	74	80,5
C	18	87	75	81,7
C	18	88	76	82,9
P	18	89		
C	19	90	77	84,1
C	20	91	78	85,4
C	23	92	79	86,6
C	23	93	80	87,9
C	24	94	81	89,1
C	26	95	82	90,3
C	28	96	83	91,6
C	28	97	84	92,8
C	28	98	85	94,1
P	29	99		
C	31	100	86	95,4
C	32	101	87	96,7
P	33	102		
C	34	103	88	98,2
C	34	104	89	99,6
C	38	105	90	101,0
C	40	106	91	102,5
P	41	107		
P	42	108		
C	46	109	92	104,4
C	46	110	93	106,3
C	55	111	94	108,2

C	70	112	95	110,2
P	100	113		

Tabla 27: Ranking de eventos fallas ajustadas CAMMT65001 (Fuente propia)

Tiempos de funcionamiento entre eventos hrs	Ranking global de eventos Kj	Ranking ajustado de fallas rj	F(t) [Ecuación 8]	R(t) [Ecuación 1]
1	1	1,0	0,01	0,99
2	3	2,0	0,02	0,98
2	4	3,0	0,02	0,98
3	5	4,0	0,03	0,97
3	7	5,0	0,04	0,96
4	8	6,1	0,05	0,95
4	9	7,1	0,06	0,94
4	10	8,1	0,07	0,93
4	11	9,1	0,08	0,92
4	12	10,1	0,09	0,91
5	13	11,2	0,10	0,90
5	14	12,2	0,11	0,89
5	15	13,2	0,11	0,89
5	16	14,2	0,12	0,88
5	17	15,2	0,13	0,87
5	18	16,2	0,14	0,86
6	20	17,3	0,15	0,85
6	21	18,3	0,16	0,84
6	22	19,3	0,17	0,83
7	23	20,4	0,18	0,82
7	25	21,4	0,19	0,81
7	26	22,4	0,20	0,80
7	27	23,5	0,21	0,79
8	28	24,5	0,22	0,78
8	29	25,6	0,22	0,78
8	30	26,6	0,23	0,77
8	31	27,6	0,24	0,76
8	32	28,7	0,25	0,75
8	33	29,7	0,26	0,74
8	34	30,8	0,27	0,73
8	35	31,8	0,28	0,72
9	36	32,8	0,29	0,71
9	41	33,9	0,30	0,70
10	44	35,1	0,31	0,69
10	45	36,2	0,32	0,68
10	46	37,3	0,33	0,67
10	47	38,5	0,34	0,66
10	48	39,6	0,35	0,65
11	49	40,7	0,36	0,64
11	50	41,8	0,37	0,63
11	51	43,0	0,38	0,62
11	52	44,1	0,39	0,61

11	53	45,2	0,40	0,60
11,8	54	46,3	0,41	0,59
12	55	47,5	0,42	0,58
12	56	48,6	0,43	0,57
12	57	49,7	0,44	0,56
13	58	50,9	0,45	0,55
13	59	52,0	0,46	0,54
15	61	53,1	0,47	0,53
15	62	54,3	0,48	0,52
15	63	55,4	0,49	0,51
15	64	56,6	0,50	0,50
15	65	57,7	0,51	0,49
16	68	58,9	0,52	0,48
16	69	60,1	0,53	0,47
16	70	61,3	0,54	0,46
16	71	62,5	0,55	0,45
16	72	63,7	0,56	0,44
16	73	64,9	0,57	0,43
16	74	66,1	0,59	0,41
16	75	67,3	0,60	0,40
16	76	68,5	0,61	0,39
17	77	69,7	0,62	0,38
17	78	70,9	0,63	0,37
18	79	72,1	0,64	0,36
18	80	73,3	0,65	0,35
18	81	74,5	0,66	0,34
18	82	75,7	0,67	0,33
18	83	76,9	0,68	0,32
18	84	78,1	0,69	0,31
18	85	79,3	0,70	0,30
18	86	80,5	0,71	0,29
18	87	81,7	0,72	0,28
18	88	82,9	0,73	0,27
19	90	84,1	0,75	0,25
20	91	85,4	0,76	0,24
23	92	86,6	0,77	0,23
23	93	87,9	0,78	0,22
24	94	89,1	0,79	0,21
26	95	90,3	0,80	0,20
28	96	91,6	0,81	0,19
28	97	92,8	0,82	0,18
28	98	94,1	0,83	0,17
31	100	95,4	0,85	0,15
32	101	96,7	0,86	0,14
34	103	98,2	0,87	0,13
34	104	99,6	0,88	0,12
38	105	101,0	0,90	0,10
40	106	102,5	0,91	0,09
46	109	104,4	0,93	0,07
46	110	106,3	0,94	0,06
55	111	108,2	0,96	0,04

70	112	110,2	0,98	0,02
----	-----	-------	------	------

Tabla 28: Cálculo función de falla acumulada CAMMT65001 (Fuente propia)

$\ln(t)$	$\ln(\ln(1/1-F(t)))$
0,000	-5,076
0,693	-4,179
0,693	-3,710
1,099	-3,390
1,099	-3,143
1,386	-2,944
1,386	-2,777
1,386	-2,632
1,386	-2,505
1,386	-2,391
1,609	-2,287
1,609	-2,193
1,609	-2,105
1,609	-2,024
1,609	-1,948
1,609	-1,877
1,792	-1,810
1,792	-1,745
1,792	-1,685
1,946	-1,627
1,946	-1,571
1,946	-1,517
1,946	-1,465
2,079	-1,416
2,079	-1,368
2,079	-1,322
2,079	-1,277
2,079	-1,234
2,079	-1,192
2,079	-1,152
2,079	-1,112
2,197	-1,073
2,197	-1,034
2,303	-0,994
2,303	-0,955
2,303	-0,917
2,303	-0,880
2,303	-0,844
2,398	-0,809
2,398	-0,774
2,398	-0,740
2,398	-0,706

2,398	-0,673
2,468	-0,640
2,485	-0,608
2,485	-0,577
2,485	-0,546
2,565	-0,515
2,565	-0,485
2,708	-0,454
2,708	-0,424
2,708	-0,394
2,708	-0,365
2,708	-0,335
2,773	-0,305
2,773	-0,275
2,773	-0,245
2,773	-0,215
2,773	-0,186
2,773	-0,156
2,773	-0,127
2,773	-0,098
2,773	-0,069
2,833	-0,040
2,833	-0,011
2,890	0,018
2,890	0,047
2,890	0,076
2,890	0,105
2,890	0,134
2,890	0,164
2,890	0,193
2,890	0,223
2,890	0,252
2,890	0,283
2,944	0,314
2,996	0,346
3,135	0,379
3,135	0,412
3,178	0,445
3,258	0,479
3,332	0,514
3,332	0,550
3,332	0,586
3,434	0,627
3,466	0,669
3,526	0,716
3,526	0,766
3,638	0,818
3,689	0,875
3,829	0,958

3,829	1,054
4,007	1,172
4,248	1,333

Tabla 29: Linealización de la función de falla acumulada y el tiempo del CAMMT65001 (Fuente propia)

t [HRS]	R(t)	F(t)	$\lambda(t)$
0	1,00	0,00	0,00
1	0,99	0,01	0,02
2	0,97	0,03	0,02
3	0,95	0,05	0,03
4	0,92	0,08	0,03
5	0,89	0,11	0,04
6	0,85	0,15	0,04
7	0,81	0,19	0,05
8	0,77	0,23	0,05
9	0,73	0,27	0,05
10	0,69	0,31	0,06
11	0,65	0,35	0,06
12	0,61	0,39	0,07
13	0,57	0,43	0,07
14	0,53	0,47	0,07
15	0,50	0,50	0,07
16	0,46	0,54	0,08
17	0,43	0,57	0,08
18	0,39	0,61	0,08
19	0,36	0,64	0,09
20	0,33	0,67	0,09
21	0,30	0,70	0,09
22	0,28	0,72	0,09
23	0,25	0,75	0,10
24	0,23	0,77	0,10
25	0,21	0,79	0,10
26	0,19	0,81	0,10
27	0,17	0,83	0,11
28	0,15	0,85	0,11
29	0,14	0,86	0,11
30	0,12	0,88	0,11
31	0,11	0,89	0,11
32	0,10	0,90	0,12
33	0,09	0,91	0,12
34	0,08	0,92	0,12
35	0,07	0,93	0,12
36	0,06	0,94	0,12
37	0,05	0,95	0,13
38	0,05	0,95	0,13

39	0,04	0,96	0,13
40	0,04	0,96	0,13
41	0,03	0,97	0,13
42	0,03	0,97	0,14
43	0,02	0,98	0,14
44	0,02	0,98	0,14
45	0,02	0,98	0,14
46	0,02	0,98	0,14
47	0,01	0,99	0,15
48	0,01	0,99	0,15
49	0,01	0,99	0,15
50	0,01	0,99	0,15
51	0,01	0,99	0,15
52	0,01	0,99	0,15
53	0,01	0,99	0,16
54	0,00	1,00	0,16
55	0,00	1,00	0,16

Tabla 30: Confiabilidad, probabilidad de falla y tasa de falla por hora del CAMMT65001 (Fuente propia)

Tipo	Tiempos de funcionamiento entre eventos hrs	Ranking global de eventos Kj	Ranking inicial de fallas	Ranking ajustado de fallas rj [Ecuación 9]
C	2	1	1	1,0
P	2	2		
C	3	3	2	2,0
C	4	4	3	3,0
C	5	5	4	4,0
C	5	6	5	5,0
C	5	7	6	6,0
C	5	8	7	7,1
C	6	9	8	8,1
C	6	10	9	9,1
C	6	11	10	10,1
P	7	12		
P	7	13		
C	7	14	11	11,1
C	8	15	12	12,1
C	8	16	13	13,2
C	8	17	14	14,2
C	8	18	15	15,2
P	9	19		
C	9	20	16	16,3
C	9	21	17	17,3
C	9	22	18	18,3
C	10	23	19	19,4

P	10	24		
P	10	25		
C	11	26	20	20,4
C	12	27	21	21,5
C	12	28	22	22,6
C	12	29	23	23,6
C	12	30	24	24,7
C	13	31	25	25,8
C	13	32	26	26,8
C	13	33	27	27,9
C	14	34	28	29,0
C	14	35	29	30,0
C	14	36	30	31,1
C	14	37	31	32,1
C	15	38	32	33,2
P	15	39		
P	15	40		
C	15	41	33	34,3
C	16	42	34	35,4
C	16	43	35	36,5
C	16	44	36	37,6
C	17	45	37	38,7
C	17	46	38	39,8
C	17	47	39	40,8
C	17	48	40	41,9
C	17	49	41	43,0
P	17	50		
C	17	51	42	44,1
C	17	52	43	45,2
C	18	53	44	46,4
C	18	54	45	47,5
C	18	55	46	48,6
P	18	56		
C	18	57	47	49,7
P	18	58		
C	18	59	48	50,9
P	18	60		
C	18	61	49	52,0
C	19	62	50	53,2
C	19	63	51	54,4
C	19	64	52	55,5
C	19	65	53	56,7
C	19	66	54	57,9
C	19	67	55	59,0
C	19	68	56	60,2
C	19	69	57	61,4

C	19	70	58	62,5
C	19	71	59	63,7
C	19	72	60	64,9
P	19	73		
C	19	74	61	66,1
C	20	75	62	67,3
C	20	76	63	68,5
C	20	77	64	69,7
C	20	78	65	70,9
P	21	79		
P	23	80		
C	24	81	66	72,1
C	24	82	67	73,4
C	25	83	68	74,7
C	25	84	69	75,9
C	26	85	70	77,2
C	27	86	71	78,5
C	29	87	72	79,8
C	29	88	73	81,0
C	29	89	74	82,3
C	30	90	75	83,6
C	30	91	76	84,8
C	31	92	77	86,1
C	31	93	78	87,4
P	32	94		
P	33	95		
P	34	96		
C	34	97	79	88,8
C	35	98	80	90,3
C	35	99	81	91,8
P	38	100		
C	38	101	82	93,4
C	38	102	83	95,0
C	45	103	84	96,6
C	45	104	85	98,1
C	50	105	86	99,7
C	53	106	87	101,3
C	54	107	88	102,9
C	55	108	89	104,5
C	60	109	90	106,1
P	62	110		
C	66	111	91	108,1
C	69	112	92	110,0
C	75	113	93	112,0

Tabla 31: Ranking de eventos fallas ajustadas CAMMT65004 (Fuente propia)

Tiempos de funcionamiento entre eventos hrs	Ranking global de eventos Kj	Ranking ajustado de fallas rj	F(t) [Ecuación 8]	R(t) [Ecuación 1]
2	1	1,0	0,01	0,99
3	3	2,0	0,02	0,98
4	4	3,0	0,02	0,98
5	5	4,0	0,03	0,97
5	6	5,0	0,04	0,96
5	7	6,0	0,05	0,95
5	8	7,1	0,06	0,94
6	9	8,1	0,07	0,93
6	10	9,1	0,08	0,92
6	11	10,1	0,09	0,91
7	14	11,1	0,10	0,90
8	15	12,1	0,10	0,90
8	16	13,2	0,11	0,89
8	17	14,2	0,12	0,88
8	18	15,2	0,13	0,87
9	20	16,3	0,14	0,86
9	21	17,3	0,15	0,85
9	22	18,3	0,16	0,84
10	23	19,4	0,17	0,83
11	26	20,4	0,18	0,82
12	27	21,5	0,19	0,81
12	28	22,6	0,20	0,80
12	29	23,6	0,21	0,79
12	30	24,7	0,22	0,78
13	31	25,8	0,22	0,78
13	32	26,8	0,23	0,77
13	33	27,9	0,24	0,76
14	34	29,0	0,25	0,75
14	35	30,0	0,26	0,74
14	36	31,1	0,27	0,73
14	37	32,1	0,28	0,72
15	38	33,2	0,29	0,71
15	41	34,3	0,30	0,70
16	42	35,4	0,31	0,69
16	43	36,5	0,32	0,68
16	44	37,6	0,33	0,67
17	45	38,7	0,34	0,66
17	46	39,8	0,35	0,65
17	47	40,8	0,36	0,64
17	48	41,9	0,37	0,63
17	49	43,0	0,38	0,62
17	51	44,1	0,39	0,61
17	52	45,2	0,40	0,60

18	53	46,4	0,41	0,59
18	54	47,5	0,42	0,58
18	55	48,6	0,43	0,57
18	57	49,7	0,44	0,56
18	59	50,9	0,45	0,55
18	61	52,0	0,46	0,54
19	62	53,2	0,47	0,53
19	63	54,4	0,48	0,52
19	64	55,5	0,49	0,51
19	65	56,7	0,50	0,50
19	66	57,9	0,51	0,49
19	67	59,0	0,52	0,48
19	68	60,2	0,53	0,47
19	69	61,4	0,54	0,46
19	70	62,5	0,55	0,45
19	71	63,7	0,56	0,44
19	72	64,9	0,57	0,43
19	74	66,1	0,58	0,42
20	75	67,3	0,59	0,41
20	76	68,5	0,60	0,40
20	77	69,7	0,61	0,39
20	78	70,9	0,62	0,38
24	81	72,1	0,63	0,37
24	82	73,4	0,64	0,36
25	83	74,7	0,66	0,34
25	84	75,9	0,67	0,33
26	85	77,2	0,68	0,32
27	86	78,5	0,69	0,31
29	87	79,8	0,70	0,30
29	88	81,0	0,71	0,29
29	89	82,3	0,72	0,28
30	90	83,6	0,73	0,27
30	91	84,8	0,75	0,25
31	92	86,1	0,76	0,24
31	93	87,4	0,77	0,23
34	97	88,8	0,78	0,22
35	98	90,3	0,79	0,21
35	99	91,8	0,81	0,19
38	101	93,4	0,82	0,18
38	102	95,0	0,83	0,17
45	103	96,6	0,85	0,15
45	104	98,1	0,86	0,14
50	105	99,7	0,88	0,12
53	106	101,3	0,89	0,11
54	107	102,9	0,90	0,10
55	108	104,5	0,92	0,08

60	109	106,1	0,93	0,07
66	111	108,1	0,95	0,05
69	112	110,0	0,97	0,03
75	113	112,0	0,99	0,01

Tabla 32: Cálculo función de falla acumulada CAMMT65004 (Fuente propia)

$\ln(t)$	$\ln(\ln(1/1-F(t)))$
0,693	-5,085
1,099	-4,187
1,386	-3,719
1,609	-3,399
1,609	-3,155
1,609	-2,957
1,609	-2,790
1,792	-2,646
1,792	-2,519
1,792	-2,406
1,946	-2,301
2,079	-2,205
2,079	-2,117
2,079	-2,035
2,079	-1,958
2,197	-1,886
2,197	-1,817
2,197	-1,753
2,303	-1,691
2,398	-1,632
2,485	-1,575
2,485	-1,520
2,485	-1,468
2,485	-1,418
2,565	-1,369
2,565	-1,323
2,565	-1,277
2,639	-1,234
2,639	-1,191
2,639	-1,150
2,639	-1,110
2,708	-1,071
2,708	-1,032
2,773	-0,994
2,773	-0,956
2,773	-0,920
2,833	-0,884

2,833	-0,850
2,833	-0,815
2,833	-0,782
2,833	-0,749
2,833	-0,716
2,833	-0,684
2,890	-0,652
2,890	-0,620
2,890	-0,589
2,890	-0,558
2,890	-0,527
2,890	-0,496
2,944	-0,465
2,944	-0,434
2,944	-0,404
2,944	-0,374
2,944	-0,345
2,944	-0,315
2,944	-0,286
2,944	-0,257
2,944	-0,228
2,944	-0,199
2,944	-0,171
2,944	-0,142
2,996	-0,113
2,996	-0,084
2,996	-0,055
2,996	-0,027
3,178	0,004
3,178	0,034
3,219	0,065
3,219	0,095
3,258	0,126
3,296	0,157
3,367	0,187
3,367	0,218
3,367	0,250
3,401	0,281
3,401	0,313
3,434	0,346
3,434	0,378
3,526	0,417
3,555	0,457
3,555	0,497
3,638	0,542
3,638	0,588
3,807	0,636
3,807	0,686
3,912	0,739

3,970	0,795
3,989	0,855
4,007	0,920
4,094	0,993
4,190	1,099
4,234	1,233
4,317	1,438

Tabla 33: Linealización de la función de falla acumulada y el tiempo del CAMMT65004 (Fuente propia)

t [HRS]	R(t)	F(t)	$\lambda(t)$
0	1,00	0,00	0,00
1	1,00	0,00	0,01
2	0,99	0,01	0,01
3	0,98	0,02	0,01
4	0,96	0,04	0,02
5	0,95	0,05	0,02
6	0,93	0,07	0,02
7	0,91	0,09	0,02
8	0,88	0,12	0,03
9	0,86	0,14	0,03
10	0,83	0,17	0,03
11	0,81	0,19	0,03
12	0,78	0,22	0,04
13	0,75	0,25	0,04
14	0,72	0,28	0,04
15	0,69	0,31	0,04
16	0,66	0,34	0,05
17	0,63	0,37	0,05
18	0,60	0,40	0,05
19	0,57	0,43	0,05
20	0,54	0,46	0,05
21	0,51	0,49	0,06
22	0,48	0,52	0,06
23	0,46	0,54	0,06
24	0,43	0,57	0,06
25	0,40	0,60	0,06
26	0,38	0,62	0,06
27	0,36	0,64	0,07
28	0,33	0,67	0,07
29	0,31	0,69	0,07
30	0,29	0,71	0,07
31	0,27	0,73	0,07
32	0,25	0,75	0,08
33	0,23	0,77	0,08
34	0,21	0,79	0,08
35	0,20	0,80	0,08
36	0,18	0,82	0,08

37	0,17	0,83	0,08
38	0,15	0,85	0,09
39	0,14	0,86	0,09
40	0,13	0,87	0,09
41	0,12	0,88	0,09
42	0,11	0,89	0,09
43	0,10	0,90	0,09
44	0,09	0,91	0,10
45	0,08	0,92	0,10
46	0,07	0,93	0,10
47	0,07	0,93	0,10
48	0,06	0,94	0,10
49	0,05	0,95	0,10
50	0,05	0,95	0,11
51	0,04	0,96	0,11
52	0,04	0,96	0,11
53	0,04	0,96	0,11
54	0,03	0,97	0,11
55	0,03	0,97	0,11
56	0,03	0,97	0,11
57	0,02	0,98	0,12
58	0,02	0,98	0,12
59	0,02	0,98	0,12
60	0,02	0,98	0,12
61	0,01	0,99	0,12
62	0,01	0,99	0,12
63	0,01	0,99	0,13
64	0,01	0,99	0,13
65	0,01	0,99	0,13
66	0,01	0,99	0,13
67	0,01	0,99	0,13
68	0,01	0,99	0,13
69	0,00	1,00	0,13
70	0,00	1,00	0,14

Tabla 34: Confiabilidad, probabilidad de falla y tasa de falla por hora del CAMMT65004. (Fuente propia)

Anexo C: Datos Jack – Knife.

SISTEMA	SUB-SISTEMA	COMPONENTE	FRECUENCIA	HRS F/S
CABINA	AIRE ACONDICIONADO	COMPRESOR	3	10,60

CABINA	AIRE ACONDICIONADO	EVAPORADOR	1	1,17
CABINA	AIRE ACONDICIONADO	FILTRO SECADOR	1	2,50
CABINA	AIRE ACONDICIONADO	LINEA DE ALIMENTACION	1	9,33
CABINA	AIRE ACONDICIONADO	TERMOSTATO	6	53,50
CABINA	AIRE ACONDICIONADO	VALVULA DE EXPANSION	1	5,50
HIDRAULICO	SISTEMA HIDRAULICO	ACEITE HIDRAULICO	1	0,50
HIDRAULICO	SISTEMA HIDRAULICO	FLEXIBLES, CONECCIONES Y FIJACIONES	3	25,33
MOTOR	LUBRICACION	ACEITE MOTOR	2	14,50
MOTOR	LUBRICACION	LINEAS DE LUBRICACION	1	13,17
MOTOR	REFRIGERACION	RADIADOR	1	5,00
ELECTRICO	ELECTRICO	CABLE	1	6,33
ELECTRICO	ELECTRICO	SENSOR PRESION	6	45,33
ELECTRICO	ELECTRICO	FUSIBLE	1	4,00
TREN DE POTENCIA	DIFERENCIAL TRASERO	ACEITE DIFERENCIAL TRASERO	1	4,17
TREN DE POTENCIA	DIFERENCIAL DELANTERO		1	4,83
HIDRAULICO	FRENO		1	9,33
CHASIS	CHASIS	TOLVA	3	16,33
TREN DE POTENCIA	NEUMATICO	NEUMATICO P#01-2-3-4	3	27,67
ELECTRICO	ELECTRICO	SWICH DE CONTACTO	1	2,50
CHASIS	SUPRESOR INCENDIO	ANSUL-AFEX	1	0,50
ELECTRICO	ELECTRICO	SENSOR	2	7,83
CABINA	INSTRUMENTOS	RADIO	1	13,83
CHASIS	SUPRESOR INCENDIO	PULSADOR	2	7,00
CABINA	INSTRUMENTOS		1	1,50
CABINA	ASIENTO	CINTURON DE SEGURIDAD	1	1,17
CABINA	CABINA	ESPEJO	4	2,83
CHASIS	SISTEMA DE SUSPENSION	ACUMULADOR	3	29,17
MOTOR	SITEMA INYECCION	LINEAS DE COMBUSTIBLE	1	9,17
MOTOR	ADMISION Y ESCAPE	SENSOR PRESION TURBO	1	12,67
TREN DE POTENCIA	NEUMATICO		1	8,50
TREN DE POTENCIA	NEUMATICO	NEUMATICO P#04	1	1,83
TREN DE POTENCIA	NEUMATICO	NEUMATICO P#02	3	26,50
HIDRAULICO	SISTEMA DE DIRECCION	FLEXIBLES, CONECCIONES Y FIJACIONES	1	12,00
CABINA	CABINA	SOPORTE CABINA	1	1,00
TREN DE POTENCIA	TRANSMISION	FILTRO ACEITE TRANSMISION	1	0,33
HIDRAULICO	FRENO	ENFRIADOR	1	12,00
CABINA	ASIENTO	ASIENTO	1	1,67
TREN DE POTENCIA	NEUMATICO	NEUMATICO P#01	1	1,50
TREN DE POTENCIA	LINEA CARDANICA	CARDAN	1	8,00
CHASIS	SISTEMA DE SUSPENSION		1	0,50
CABINA	LIMPIA PARABRISAS		1	1,67

MOTOR	ELECTRONICO	HARNES	1	8,00
CHASIS	SUPRESOR INCENDIO	EXTINTOR	1	0,33
TREN DE POTENCIA	NEUMATICO	NEUMATICO P#03-4	1	17,00
ELECTRICO	ELECTRICO	RELE	1	0,67
MOTOR	ADMISION Y ESCAPE	TUBERIA LINEA DE ESCAPE	1	0,83
TREN DE POTENCIA	LINEA CARDANICA	CARDAN	1	12,00
TREN DE POTENCIA	TRANSMISION	ACEITE TRANSMISIÓN	2	6,50
ELECTRICO	ILUMINACION	FOCO TRASERO	1	1,67
ELECTRICO	ILUMINACION	FOCO FAENERO	1	1,33
ENGRASE CENTRALIZADO	SISTEMA ENGRASE	DEPOSITO	12	38,50
ENGRASE CENTRALIZADO	SISTEMA ENGRASE		2	1,00

Tabla 35: Árbol de falla con frecuencias y MTTR para el 2018 del camión 1 (Fuente propia)

SISTEMA	SUB-SISTEMA	COMPONENTE	FRECUENCIA	HRS F/S
CABINA	AIRE ACONDICIONADO	COMPRESOR	2	6,17
CABINA	AIRE ACONDICIONADO	EVAPORADOR	1	12,00
HIDRAULICO	SISTEMA HIDRAULICO	FLEXIBLES	1	5,33
MOTOR	ADMISION Y ESCAPE	FILTRO AIRE PRIMARIO	2	2,33
MOTOR	ADMISION Y ESCAPE	SILENCIADOR	1	12,00
MOTOR	LUBRICACION	FILTRO DE ACEITE	1	2,50
CHASIS	IMPLEMENTO	TOLVA	3	6,50
TREN DE POTENCIA	NEUMATICO	NEUMATICO P#01-2-3-4	4	3,50
ENGRASE CENTRALIZADO	SISTEMA ENGRASE	DEPOSITO	18	42,67
CABINA	INSTRUMENTOS		3	1,00
TREN DE POTENCIA	TRANSMISION	FLEXIBLES	9	47,17
HIDRAULICO	SISTEMA HIDRAULICO	BLOCK	3	12,67
TREN DE POTENCIA	NEUMATICO	NEUMATICO P#01	4	31,67
ELECTRICO	ILUMINACION	FOCOS TRASEROS	1	9,67
TREN DE POTENCIA	NEUMATICO	NEUMATICO P#02	2	4,33
MOTOR	LUBRICACION	ACEITE MOTOR	2	12,33
TREN DE POTENCIA	NEUMATICO	NEUMATICO	1	1,00
CHASIS	SUPRESOR INCENDIO	EXTINTOR MANUAL	2	3,00
ELECTRICO	ELECTRICO	SENSOR	1	12,67
ELECTRICO	ELECTRICO	CABLE	2	11,90
CABINA	INSTRUMENTOS	RADIO	1	9,17
MOTOR	SITEMA INYECCION	FILTRO COMBUSTIBLE DECANTADOR PRIMARIO	1	8,83

CABINA	CABINA	ESPEJO	3	7,83
MOTOR	REFRIGERACION	RADIADOR	1	1,33
TREN DE POTENCIA	LINEA CARDANICA	CARDAN TRASERO	1	18,00
HIDRAULICO	SISTEMA HIDRAULICO	VALVULAS DE CONTROL	1	9,83
TREN DE POTENCIA	TRANSMISION	TRANSMISION	1	7,33
ENGRASE CENTRALIZADO	SISTEMA ENGRASE		2	2,67
TREN DE POTENCIA	DIFERENCIAL TRASERO	ACEITE DIFERENCIAL TRASERO	1	1,00
HIDRAULICO	SISTEMA DE DIRECCION		2	10,33
CHASIS	SUPRESOR INCENDIO	ESTANQUE SUPRESOR INCENDIO	1	12,00
CHASIS	SISTEMA DE SUSPENSION		1	0,67
ELECTRICO	ELECTRICO	CAMARA DE RETROCESO	3	9,57
TREN DE POTENCIA	NEUMATICO	NEUMATICO P#04	2	8,50
CABINA	CABINA	PUERTA	1	6,17
TREN DE POTENCIA	NEUMATICO	NEUMATICO P#03	1	14,33
HIDRAULICO	FRENO	ENFRIADOR	1	12,00
TREN DE POTENCIA	TRANSMISION	TRANSMISION	1	5,17
TREN DE POTENCIA	NEUMATICO	NEUMATICO P#01-2	2	9,50
MOTOR	SITEMA INYECCION	LINEAS DE COMBUSTIBLE	1	4,17
TREN DE POTENCIA	NEUMATICO	NEUMATICO P#03-4	1	0,33
CABINA	LIMPIA PARABRISAS		1	8,00

Tabla 36: Árbol de falla con frecuencias y MTTR para el 2018 del camión 4 (Fuente propia)

Anexo D: Tablas MAFEC

Tabla de severidad (S) Asigne un valor único a cada dimensión. Luego seleccione el valor máximo asignado
--

A) Riesgos en Seguridad			
Clasificación	Descripción	Escala	Valor Dimensión A
Nulo	La falla no genera un riesgo perceptible a la seguridad de los trabajadores	1	
Bajo	La falla genera un riesgo menor, que puede ser controlado	2 a 3	
Moderado	Se genera un riesgo de seguridad serio, pero este puede ser controlado	4 a 6	
Alto	La falla genera un riesgo a la seguridad que no puede controlarse con los recursos actuales	7 a 8	
Muy Alto	La falla genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos.	9 a 10	
B) Riesgos al Medio Ambiente			
Clasificación	Descripción	Escala	Valor Dimensión B
Nulo	La falla no genera un riesgo perceptible en el ambiente	1	
Bajo	La falla genera un riesgo medioambiental menor, que puede ser controlado	2 a 3	
Moderado	Se genera un riesgo de medioambiental serio, pero este puede ser controlado	4 a 6	
Alto	La falla genera un riesgo de daños al medio ambiente que no puede controlarse con los recursos actuales	7 a 8	
Muy Alto	La falla genera un riesgo medioambiental incontrolable que puede tener efectos catastróficos.	9 a 10	
C) Perdidas de Producción - Tiempo fuera de servicio			
Clasificación	Descripción	Escala	Valor Dimensión C
Nulo	La falla no provoca detenciones de equipos y/o procesos críticos	1	
Bajo	La falla provoca la detención de equipos y/o procesos críticos menores a una hora	2 a 3	
Moderado	La falla provoca una detención de equipos y/o procesos críticos mayores a una hora y menores a dos horas	4 a 6	
Alto	La falla provoca una detención de equipos y/o procesos críticos entre dos horas y ocho horas	7 a 8	
Muy Alto	La falla provoca una detención de equipos y/o procesos críticos mayores a ocho horas	9 a 10	
D) Costos de reparación/reemplazo			
Clasificación	Descripción	Escala	Valor Dimensión D
Nulo	El costo esperado de reparación/reemplazo es inferior a US\$100	1	
Bajo	El costo esperado de reparación/reemplazo se encuentra entre US\$100 y US\$1000	2 a 3	

Moderado	El costo esperado de reparación/reemplazo se encuentra entre US\$1000 y US\$10000	4 a 6	
Alto	El costo esperado de reparación/reemplazo se encuentra entre US\$10000 y US\$20000	7 a 8	
Muy Alto	El costo esperado de reparación/reemplazo es mayor a US\$20000	9 a 10	

Tabla 37: Tabla de Severidad MAFEC (Artigas, 2020)

Tabla de Valoración de Ocurrencia (O)		
Frecuencia	Probabilidad de falla	Valor
Hasta 1 vez por año	Pequeña, la falla es imposible	1
más de 1 vez por año		2
Hasta 1 vez por mes	Moderada, falla ocasional	3
más de 1 vez por mes		4
Hasta 1 vez por semana	Alta, falla frecuente	5
más de 1 vez por semana		6
Hasta 1 vez al día	Muy alta, muy frecuente	7
más de 1 vez al día		8
Hasta 1 vez por turno		9
más de 1 vez por turno		10

Tabla 38: Tabla de valoración de ocurrencia. (Artigas, 2020)

Tabla de valoración de la Detectabilidad (D)		
Detección	Probabilidad de detección	Valor
Muy alta	El problema es evidente, se detectara con toda certeza	1 y 2
Alta	Existe alta probabilidad de detección	3 y 4
Moderada	Se puede detectar la falla, mediante un programa de verificación	5 y 6
Baja	Aun usando un programa de verificación, es improbable que se detecte el problema	7 y 8
Muy baja	No se detectara, con alta probabilidad un problema	9
Nula	Falla oculta; no se detectará o bien no existe un programa de verificación que permita detectarla	10

Tabla 39: Tabla de valoración de la detectabilidad. (Artigas, 2020)