

**ENFOQUE DE MANTENIMIENTO RCM APLICADO A UNA FLOTA DE
VEHÍCULOS GRÚAS EN UNA EMPRESA DE SERVICIOS DEL SECTOR
ELÉCTRICO**

ORLANDO OROZCO VEGA

COD: 2169126



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
POSGRADO EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA**

2018

**ENFOQUE DE MANTENIMIENTO RCM APLICADO A UNA FLOTA DE
VEHÍCULOS GRUAS EN UNA EMPRESA DE SERVICIOS DEL SECTOR
ELÉCTRICO**

ORLANDO OROZCO VEGA

**MONOGRAFÍA DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
ESPECIALISTA EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO**

DIRECTOR

**PEDRO JOSÉ DÍAZ GUERRERO
M. Sc. INGENIERIA MECÁNICA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA**

2018

4.2 MARCO CONCEPTUAL	53
4.2.1 Causas de la falla. Factores de tipo físico, químico u otros, que llevan a la falla a un componente de máquina, sea éste: mecánico, eléctrico, electrónico o software. Controlando las causas se evita el desarrollo de los eventos de falla.	53
5. ESTRATEGIA METODOLÓGICA	55
5.1 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA EN ESTUDIO	55
5.1.1 Propósito del plan RCM.	60
5.2 DEFINICIÓN DEL CONTEXTO OPERACIONAL DE LOS EQUIPOS	61
5.2.1 Perfil estadístico de fallas correctivas.	62
5.3 ANÁLISIS FMEA.....	68
5.4 ASIGNACIÓN DE VALORES NPR	74
5.5 PLAN DE MANTENIMIENTO RCM PROPUESTO	77
5.6 MODELO DE COSTOS PARA ASIGNAR FRECUENCIA ÓPTIMA DEL PLAN.	83
5.7 DOCUMENTACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO RCM PROPUESTO .	90
6. CONCLUSIÓN	93
BIBLIOGRAFÍA.....	94
ANEXOS	96

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Matriz usada para aplicar el análisis FMEA.	24
Tabla 2. Escala cuantitativa para el factor de costos en relación a las consecuencias de las fallas.	26
Tabla 3. Escala para el factor posibilidad de ocurrencia de las fallas.	27
Tabla 4. Escala para el factor posibilidad de detección.	27
Tabla 5. Escala para el factor relacionado con fallas ocultas.	27
Tabla 6. Diagrama de decisión RCM para definir tipología de acción de mantenimiento.	28
Tabla 7. Descripción de componentes neumáticos de freno.	40
Tabla 8. Ecuaciones para frecuencia acumulada.	52
Tabla 9. Listado de vehículos del parque analizado.	55
Tabla 10. Lista de chequeo para el parque de grúas.	56
Tabla 11. Resultados de aplicar la lista de chequeo.	57
Tabla 12. Datos de falla para el sistema de frenos.	63
Tabla 13. Datos de falla para el sistema de suspensión.	65
Tabla 14. Datos de falla para el sistema de embrague.	66
Tabla 15. Tabla FMEA para el parque de grúas.	68
Tabla 16. Números NPR para las fallas analizadas.	74
Tabla 17. Plan de mantenimiento con base RCM.	77
Tabla 18. Costo total para sistema de frenos en función de intervalo t de recambio.	85
Tabla 19. Costo total de sistema de suspensión en función de intervalo t de recambio.	87

Tabla 20. Costo total de sistema de embrague en función de intervalo t de recambio.....88

Tabla 21. Formato de orden de trabajo.....91

Tabla 22. Formato de cálculo de disponibilidad.....92

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Perfil de fallas para el grupo en análisis.	15
Figura 2. Grúa international montada en camión plataforma.	31
Figura 3. Muelle de hojas del camión.	32
Figura 4. Embrague mecánico de doble disco.	34
Figura 5. Esquema de componentes mecánicos del freno de tambor para una rueda.....	35
Figura 6. Cámara de freno tipo doble función (parqueo y frenado normal).....	36
Figura 7. Válvula relays de frenado.	37
Figura 8. Válvula del pedal de accionamiento del freno.....	38
Figura 9. Esquema de un sistema de freno neumático para un camión rígido de tres ejes.	39
Figura 10. Formas de distribuciones de Weibull.	49
Figura 11. Datos representados en papel Weibull.	49
Figura 12. Distribución Weibull para el sistema de frenos.	64
Figura 13. Distribución Weibull para el sistema de suspensión.	66
Figura 14. Distribución Weibull para el sistema de embrague.	67
Figura 15. Perfil de costo total para sistema de frenos.	86
Figura 16. Perfil de costo total para sistema de suspensión.....	87
Figura 17. Perfil de costo total para sistema de embrague.....	89

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. FUNCIÓN DE CONFIABILIDAD Y DE PROBABILIDAD DE FALLA ACUMULADAS.....	96
Anexo B. ESTIMACIÓN CUASI GRÁFICA DE PARÁMETROS PARA EL MODELO DE WEIBULL A PARTIR DE DATOS.	97
Anexo C. POSIBLE INTERPRETACIÓN DE VALORES DE LOS PARÁMETROS.	98

RESUMEN

TITULO:

ENFOQUE DE MANTENIMIENTO RCM APLICADO A UNA FLOTA DE VEHÍCULOS GRÚAS EN UNA EMPRESA DE SERVICIOS DEL SECTOR ELÉCTRICO. *

AUTOR:

ORLANDO OROZCO VEGA**

PALABRAS CLAVES: CONFIABILIDAD, DISPONIBILIDAD, MANTENIMIENTO.

DESCRIPCIÓN:

En esta monografía, se propone un plan de mantenimiento aplicado a un parque de grúas, utilizadas para realizar mantenimiento a redes de distribución de energía eléctrica de baja, mediana y alta tensión bajo la metodología denominada RCM (Reliability Centered Maintenance o mantenimiento centrado en la confiabilidad). Con base en el método de Pareto, se identifican y analizan los sistemas críticos los cuales nos afecta la disponibilidad, la confiabilidad y los costos de: frenos, dirección y suspensiones.

Inicialmente, se realiza el análisis desde una perspectiva cualitativa, aplicando la metodología FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), acoplada con el concepto de numero prioritario de riesgo o NPR, que permite seleccionar las actividades de mantenimiento más oportunas e importantes a realizar, facilitando asignar los recursos siempre escasos a las operaciones que representan mayor beneficio para el sistema analizado. Se realiza un análisis cuantitativo mediante un modelo de optimización de costos, para asignar la frecuencia idónea para cada modo de falla atendido por el plan de mantenimiento propuesto, por consiguiente se está en capacidad de analizar y mejorar los indicadores de desempeño como la disponibilidad, confiabilidad de los equipos y la relación presupuesto ejecutado / presupuesto planificado disminuyendo el porcentaje de sobre-costos.

*Monografía

**Facultad de ingenierías físico – mecánicas. Especialización en gerencia de mantenimiento, Director Ing. Pedro José Díaz Guerrero, MSc Ingeniería mecánica

ABSTRACT

TITLE: RCM MAINTENANCE APPROACH APPLIED TO A FLEET OF CRANES IN A SERVICE COMPANY OF THE ELECTRIC SECTOR

AUTHOR: ORLANDO OROZCO VEGA

KEYWORDS: RELIABILITY, AVAILABILITY, MAINTENANCE.

DESCRIPTION

In this monograph, a maintenance plan is proposed applied to a park of cranes, used to perform maintenance on low, medium and high voltage electrical networks, guided by the methodology called RCM (reliability centered maintenance). Based on the Pareto method, critical braking, steering and suspension systems are identified and analyzed. Initially, the analysis is carried out from a qualitative perspective, applying the FMEA Methodology (Failure Mode and Effect Analysis), coupled with the concept of priority number of PNR risk that allows selecting the most important maintenance activities to be carried out, making it easy to assign resources always scarce to operations that represent a greater benefit for the system analyzed. In a complementary manner, a quantitative analysis is carried out using a cost optimization model to assign the appropriate frequency for each failure mode served by the proposed maintenance plan. In this way, it is able to improve performance indicators such as the availability of equipment and the budget ratio executed - planned budget.

*Monograph

**Faculty of physical – mechanical engineering. Specialization in maintenance management. Director Ing. Pedro Jose Diaz Guerrero , MSc mechanical engineering

INTRODUCCIÓN

Se propone desarrollar un plan de mantenimiento preventivo basado en el enfoque RCM, para mejorar los indicadores de desempeño operacional de disponibilidad y costos, en un parque de 10 grúas de tipo móvil, que son vehículos utilizados en el apoyo de los procesos logísticos de una empresa de la región Caribe, que opera en el sector de la distribución de energía eléctrica a nivel residencial, comercial e industrial.

El plan se fundamenta en la premisa del enfoque de mantenimiento que expresa: “RCM es un proceso utilizado para determinar que se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual” . [1]. Por esto, se elabora el plan de mantenimiento, teniendo como referente el actual perfil de fallas del parque de grúas móviles, aplicando herramientas estadísticas en un modelo de costo propuesto, que cuantifica el impacto técnico – económico del accionar preventivo y correctivo, ajustando las acciones de mantenimiento identificadas durante el proceso desarrollado, para asegurar con la aplicación del plan, el control de las 50 fallas imprevistas que han ocurrido en el año 2016 y reducir las afectaciones negativas de aumento del presupuesto en más del 8 % de lo esperado. Con esto, se define como meta anual de aplicación del plan, la reducción del número de

¹ MOUBRAY J. mantenimiento centrado en la confiabilidad. Editorial Aladon. Año 2010.

fallas correctivas a 20 y desborde del presupuesto a un valor máximo del 15 %. Permitiendo además, que en los años siguientes se mantengan los beneficios esperados y además, mejorar los indicadores de disponibilidad y control del presupuesto.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

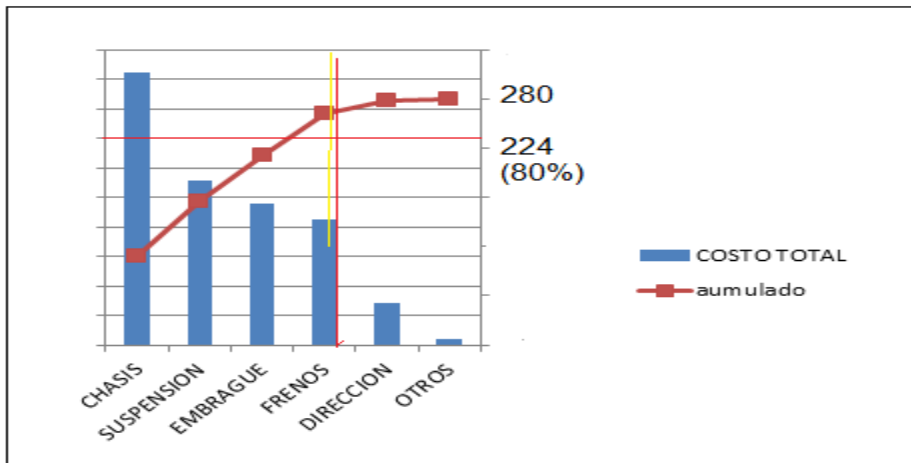
Las empresas del sector de servicios eléctricos cumplen una importante función socio económica en la ciudad de Barranquilla. La atención a las líneas de distribución de la energía eléctrica a los sectores residencial, comercial e industrial, es vital para garantizar el normal suministro de la energía eléctrica y con ello, puedan desarrollarse las diversas actividades que se requieran en cada sector. Para asegurar la prestación de este servicio público, las empresas comercializadoras de energía contratan en modalidad outsourcing, a empresas especializadas que resuelven aspectos internos necesarios para asegurar un servicio de energía de calidad, principalmente porque existen contratos vigilados por agencias del gobierno, que penalizan el no cumplimiento de indicadores técnicos que miden la calidad mínima del servicio de energía eléctrica pública, prestado por particulares.

Se tiene para propósito de análisis y mejora, una empresa que operan en modalidad outsourcing en el sector eléctrico de la ciudad de Barranquilla y la región Caribe. Esta se dedica a reparar e instalar líneas eléctricas de distribución de energía eléctrica en modalidad de baja, media y alta tensión, en trabajos en frío o sin flujo de energía eléctrica y en caliente o trabajos sin suspensión del flujo de energía eléctrica. Entre los recursos necesarios para realizar la labor que es misión de la empresa, se tiene una flota de vehículos tipo grúa, los cuales apoyan la logística del proceso, transportando personal y herramienta, así como postes de

energía eléctrica con pesos entre 1 y 3 toneladas, rollos de cables y demás elementos necesarios para realizar este tipo de trabajos. También se utilizan para montar y desmontar transformadores eléctricos de hasta una tonelada de peso. La falla de estos vehículos representa una gran afectación para las metas del negocio al disminuirse la disponibilidad operacional y elevarse sin control los costos operativos, que incluyen los costos de las reparaciones y el lucro cesante que representa el equipo en reparación.

El parque de grúas consiste de 10 equipos móviles de la marca International desde modelos del año 1994 hasta 2005. Se aplica un plan de mantenimiento preventivo basado en el concepto de gama que propone el fabricante en periodos medidos por kilometraje que llegan hasta los 350.000 kilómetros. Para el año 2016 el presupuesto de mantenimiento preventivo se define en un valor global de 150 millones de pesos, lo cual es desbordado por la realidad al tenerse un consolidado real de 380 millones de pesos en el departamento de mantenimiento de este grupo de grúas. Al aplicarse un Pareto de las fallas correctivas que se presentan, se define el perfil que muestra la figura 1. Se observa que el 80% de los costos totales de mantenimiento se aplican a los componentes de chasis, suspensión, embragues y frenos. Estas fallas poseen afectación doble. Por un lado causan los comentados sobrecostos al presupuesto de más del 85% y la suspensión anual de alrededor de 50 órdenes de trabajo, que crean pérdidas no cuantificadas por lucro cesante y pérdida de imagen como contratistas efectivos.

Figura 1. Perfil de fallas para el grupo en análisis.



Fuente: autor.

Revisadas las tareas de mantenimiento preventivo que se aplica a estos equipos, se encuentra que existen algunas de tipo preventivo como: revisiones, limpiezas, ajustes, lubricaciones y cambio programado de piezas, lo cual evidencia los siguientes aspectos.

- Las tareas de mantenimiento preventivo actuales no son efectivas en la medida que ocurren en el año 2016, 50 fallas correctivas. Esto sugiere ajustes de las mismas, sea por agregación, remplazo o ajuste de la frecuencia con la cual se aplican. Además de no disponer de procedimientos estandarizados para la ejecución y evaluación, soportando los resultados esperados solo en la experiencia del personal de mantenimiento disponible.

- Creación de nuevas tareas de mantenimiento preventivo que se ajusten a la realidad de las actuales fallas correctivas para mejorar en su control.

Para lograr las mejoras pretendidas de mayor disponibilidad de los equipos y menor porcentaje de sobrecosto, además de la reducción de las órdenes de trabajos eléctricos suspendidas por fallas imprevistas de los equipos grúa, se propone el desarrollo de un plan de mantenimiento preventivo basado en el enfoque RCM que permite obtener las siguientes metas.

- Un plan de mantenimiento preventivo que disminuya en un alto porcentaje las fallas imprevistas actuales.
- Un plan de mantenimiento preventivo que permita estimar las frecuencias óptimas de las acciones que controlan las fallas imprevistas y sobre esta base plantear la programación del mantenimiento, como requisito esencial para generar control sobre los eventos y costos en los componentes críticos.
- Un sistema de documentos y manejo de la información que permite el registro, análisis y el control de los costos derivados del accionar de mantenimiento.

2. JUSTIFICACIÓN

Con la elaboración del plan de mantenimiento preventivo, basado en el enfoque RCM, se espera de manera razonable, reducir las órdenes de trabajo de tipo eléctrico no ejecutadas por fallas de las grúas, que son misión de la compañía, para pasar de 50 en el año 2016, las cuales en el año 2017 primer semestre han superado las 28 órdenes incumplidas a una cifra de 20 fallas máximo en el año 2018, una reducción esperada del 50% en las mismas. De manera complementaría reducir el sobrecosto en el presupuesto del 85% al 25%.

Con el logro de las mejoras esperadas, se espera reducir las afectaciones externas derivadas de las fallas de las grúas, dado que los sistemas de suspensión, frenos y dirección son parte esencial en el desempeño seguro de cualquier vehículo y se presentan daños repetidos en los mismos, lo cual afortunadamente hasta el momento no han llegado a causar accidentes graves, aunque si han ocurrido diversos incidentes con afectación económica. Por esto, la mejora en la gestión del mantenimiento, aumenta la seguridad vial de los grúas y disminuye el riesgo de causar graves daños a la propiedad y la integridad física al interior y exterior de la empresa.

También se espera establecer la frecuencia idónea de las acciones de mantenimiento preventiva, que controlen las fallas imprevistas que han estado

ocurriendo, con lo cual se tiene la base para establecer un presupuesto cercano a la realidad y ajustar el uso del parque de vehículos, según los trabajos eléctricos requeridos. Esto permite mejorar los procesos de planeación del sistema y la imagen del accionar de la empresa en modalidad de contratista externo efectivo.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Elaborar un plan de mantenimiento preventivo basado en el enfoque RCM, para mejorar la disponibilidad operacional del parque automotor de las grúas que soportan el servicio de líneas de transmisión eléctrica, controlando los costos para tener una mejor rentabilidad del negocio.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Caracterizar el actual plan de mantenimiento preventivo que se aplica al parque de grúas en estudio para identificar fortalezas y debilidades.
- Aplicar la técnica de análisis y efecto de fallas mediante tablas de captura y organización de datos e información para identificar las funciones, fallas funcionales, causas, efectos y consecuencias en los sistemas críticos según el análisis de Pareto.

- Desarrollar las acciones de mantenimiento preventivo según el diagrama de decisión del enfoque RCM y asignar el número prioritario de riesgos NPR para establecer las operaciones a atender con el plan propuesto.
- Definir las acciones de mantenimiento preventivo, la respectiva frecuencia optimizada y los procedimientos de ejecución, que aseguren el control de las actuales fallas imprevistas, mediante la construcción de tablas de manejo de la información.
- Elaborar la documentación que facilite la aplicación y el control del plan propuesto para alcanzar las mejoras pretendidas.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 MARCO TEÓRICO

4.1.1 Metodología RCM. La metodología del área de mantenimiento RCM, tiene amplia aplicación en sistemas tecnológicos existentes, donde a pesar de aplicar planes de mantenimiento preventivo, suceden fallas inesperadas que desbordan la asignación presupuestal. El criterio de partida del enfoque RCM es que las acciones de mantenimiento deben ajustarse al contexto operacional del equipo, lo cual algunas veces no es cubierto por el plan de mantenimiento que sugiere el fabricante o el distribuidor del equipo o instalación e incluso el de experiencia que la empresa posea. [7].

El enfoque RCM se soporta en cuatro grandes pasos, que son:

- Análisis de fallas reales y potenciales aplicando el enfoque FMEA o análisis de efecto y modo de las fallas por sus siglas en inglés. Con esto quedan definidas las causas de las diversas fallas a nivel de módulos, componentes e incluso piezas específicas.
- Priorización de acciones de mantenimiento. A las causas identificadas del paso anterior, se les deben definir una serie de acciones de mantenimiento, las

cuales deben priorizarse para aplicar efectivamente los recursos siempre escasos que el departamento de mantenimiento tiene asignados por presupuesto de la gerencia. Para realizar este proceso, la metodología RCM usa el número prioritario de riesgo o NPR.

- Definición del tipo de acción de mantenimiento. Las acciones de mantenimiento pueden ser de tipo correctiva, preventiva, predictiva, de detección o modificativas. Entonces el mapeo de acciones priorizadas del paso anterior, debe ser clasificada por tipos para definir la manera en que se ejecutan. Para realizar este proceso, la metodología RCM usa el llamado diagrama de decisión.
- Análisis de resultados y ajusté periódicos. Cuando el plan se pone en acción ocurren unos resultados. Por esto se definen aspectos relacionados con la planeación y el control, mediante la creación de documentación e indicadores, que capturen el impacto del nuevo enfoque de gestión del mantenimiento y que pueda permitir realizar los ajustes, siempre necesarios, ya que no existe ningún plan ni ninguna metodología perfecta, que garantice por sí sola, lograr al 100 % los resultados deseados. [7].²

4.1.1.1 Proceso de análisis de efecto, causa con enfoque FMEA. El proceso de análisis de fallas con el enfoque RCM inicia con la identificación de las funciones de los módulos y las correspondientes fallas funcionales a nivel de módulos y / o componentes (partes de un módulo funcional). En el supuesto de que ocurra la falla, se definen los efectos físicos o similares negativos de la misma en el equipo. Luego se determinan cuales son todas las probables causas de esta falla en particular, lo cual requiere conocer en detalle el funcionamiento del sistema en análisis. Hasta este punto se tiene información sobre las causas de las fallas y falta definir qué acciones de mantenimiento de las disponibles se aplicaran para controlar las causas. La idea es que controlada la causa no se produce la

⁷ DUFFUAA S, Raouf A and Dixon J Año 2010 "Sistemas de mantenimiento: Planeación y Control". Editorial Limusa.

falla y se aumenta la confiabilidad y la disponibilidad del equipo, que es el objetivo final. La tabla 1 es la herramienta base para la aplicación del enfoque FMEA. Se observa la primera columna dónde se colocan los componentes a analizar. En la siguiente el efecto físico esperado cuando el modulo falla en su contexto operacional (indicación de mal desempeño). En la columna de causas de la falla, se anotan todas las probables causas que llevan a la falla del módulo analizado en el contexto operacional. La columna consecuencia de la falla trata de definir el impacto negativo que tiene la falla de ese modulo en seguridad, producción, calidad y medio ambiente, no se debe confundir con la columna de efectos de la falla que trata de identificar cambios de variables físicas medibles que se relacionen con el desempeño.

La columna de probabilidad de falla se relaciona con asignar valores de incidencia de la falla del módulo en estudio respecto al número total de fallas. La columna detección de la falla se relaciona con la instrumentación y control del equipo, que permite detectar en sus inicios una operación fuera del rango normal de desempeño en el contexto operacional de utilización.

El criterio subyacente es analizar las causas de las fallas y priorizarlas. A partir de este mapa de causas de fallas a controlar mediante aplicación del plan de mantenimiento, se tiene la información necesaria para definir las acciones de control que tengan un impacto efectivo en los resultados de mejora que se pretenden.

Tabla 1. Matriz usada para aplicar el análisis FMEA.

Módulos (M) Ó Pieza (P)	Falla funcional	Efecto de la falla	Causas de la falla	Consecuencia de la falla	Probabilidad de la falla	Detección de la falla
M1/ P1						
M2 / P2						
Mn-1						
Mn/ Pn						

Fuente: Adaptado de Moubray J. mantenimiento centrado en la confiabilidad. Editorial Aladon. Año 2010.

4.1.1.2. Proceso de análisis de criticidad de las fallas y asignación de valor

NPR. Cuando se tienen todas las causas de las fallas identificadas, se llega a definir el mapa de fallas para el sistema en análisis y se entra a detallar las acciones de mantenimiento proactivo a aplicar según el enfoque RCM. Con esto se puede llegar a tener una cantidad excesiva de las mismas que hace impráctico aplicar este enfoque. Por lo tanto se deben priorizar las acciones en función de su impacto en las áreas de seguridad, calidad, medio ambiente y posibilidad de control con la detección temprana de la futura falla, todos estos factores se convierten en la base para establecer un rango de criticidad de las acciones de mantenimiento que el sistema necesita, que puede llegar a cuantificarse mediante el llamado número prioritario de riesgo (NPR).

La ecuación 1 muestra el modo de estimar el número prioritario de riesgo (NPR) para cada falla.

Ecuación 1

$$\text{NPR} = C \times P_o \times D$$

Dónde:

C es la consecuencia de la falla, la cual tiene un valor asignable según la tabla 2 para el factor de costos (existen otros factores encontrados en el anexo 1).

P_o es la posibilidad de ocurrencia de la falla, la cual tiene un valor asignable según la tabla 3.

D es la posibilidad de detección de la falla, la cual tiene un valor asignable según datos de la tabla 4. Esta tabla se acopla con el número 5 relacionada con las fallas ocultas para definir el valor a asignar a la causa en análisis

Se anota que existe la posibilidad de lo que se denominan fallas ocultas. Estas permanecen latentes, sin que los sistemas de seguridad y control detecten su posible aparición. Dado que su aparición puede afectar de diversos modos la instalación o equipo, se define un factor adicional de priorización para este tipo de fallas. La tabla 6 muestra la escala recomendada por especialistas en el tema.

Tabla 2. Escala cuantitativa para el factor de costos en relación a las consecuencias de las fallas.

OR - Costos de Reparación	
Entre 1 y 50 dólares	- 0
Entre 51 y 500 dólares	- 1
Entre 501 y 5.000 dólares	- 2
Entre 5.001 y 50.000 dólares	- 3
Mayor a 50.001 dólares	- 4
OC - Efectos en Clientes	
Entre 1 y 50 dólares	- 0
Entre 51 y 500 dólares	- 1
Entre 501 y 5.000 dólares	- 2
Entre 5.001 y 50.000 dólares	- 3
Mayor a 50.001 dólares	- 4

Fuente: José Elías Arzuaga Churio. "Modelo de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) en la flota de equipos de oruga D11N de la empresa minera Drummond Ltda". Trabajo de grado especialista. Universidad Industrial de Santander. Año 2014.

Tabla 3. Escala para el factor posibilidad de ocurrencia de las fallas.

Ocurrencia
Frecuente - 1 falla en 1 mes - 4
Ocasional - 1 falla en 1 año - 3
Remota - 1 falla en 5 años - 2
Poco probable - 1 falla en 20 años - 1

Fuente: Fuente: José Elías Arzuaga Churio. “Modelo de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) en la flota de equipos de oruga D11N de la empresa minera Drummond Ltda”. Trabajo de grado especialista. Universidad Industrial de Santander. Año 2014.³

Tabla 4. Escala para el factor posibilidad de detección.

Detección
Nula - No se puede detectar una causa potencial / mecanismo y modo de fallo subsecuente - 4
Baja - Baja probabilidad para detectar causas potenciales/mecanismos y modos de fallos subsecuentes - 3
Media - Mediana probabilidad para detectar causas potenciales / mecanismos y modos de fallos subsecuentes - 2
Seguro - Siempre se detectarán causas potenciales / mecanismos y modos de fallos subsecuentes - 1

Fuente: Fuente: José Elías Arzuaga Churio. “Modelo de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) en la flota de equipos de oruga D11N de la empresa minera Drummond Ltda”. Trabajo de grado especialista. Universidad Industrial de Santander. Año 2014.

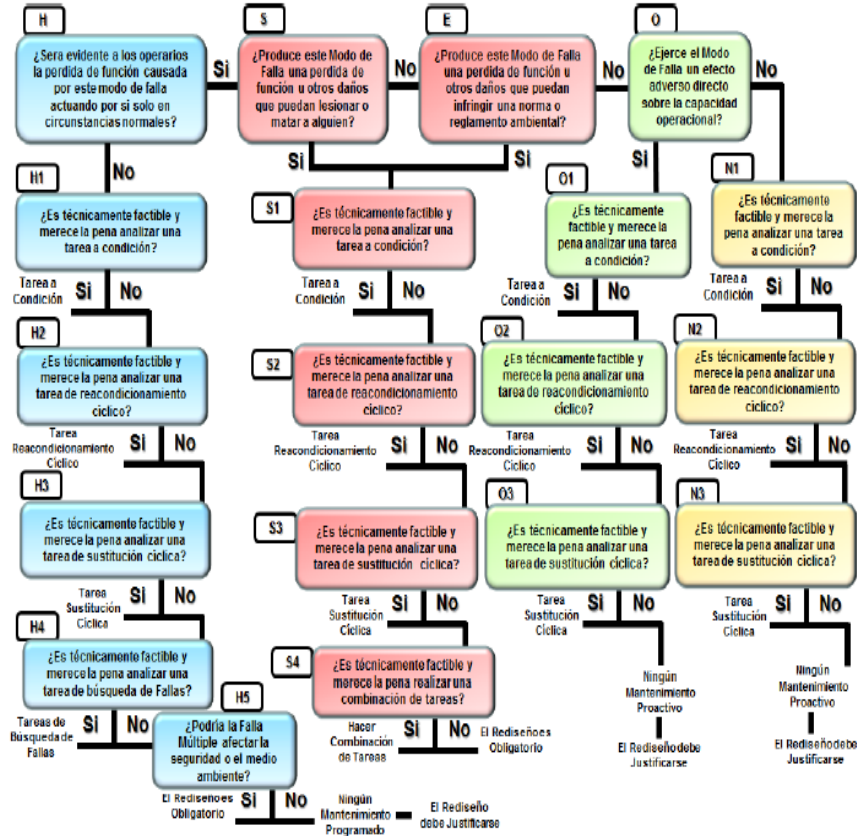
Tabla 5. Escala para el factor relacionado con fallas ocultas.

² José Elías Arzuaga Churio. “Modelo de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) en la flota de equipos de oruga D11N de la empresa minera Drummond Ltda”. Trabajo de grado especialista. Universidad Industrial de Santander. Año 2014

FO - Fallos Ocultos
No existen fallas ocultas que puedan generar fallas múltiples posteriores - 0
Existe una baja posibilidad de que la falla NO sea detectada y ocasione fallas múltiples posteriores - 1
En condiciones normales la falla siempre será oculta y generará fallas múltiples posteriores - 2
Existe una baja posibilidad de que la falla SÍ sea detectada y ocasione fallas múltiples posteriores - 3
La falla siempre es oculta y ocasionará fallas múltiples graves en el sistema - 4

4.1.1.3 Proceso de decisión RCM para definir la tipología de las acciones de mantenimiento. Definidas las causas de fallas a atender. Ahora se definen las acciones de mantenimiento que las eliminan o controlan. Esto es un resultado particular que corresponde al equipo o instalación en análisis. Teniendo las acciones definidas, se determina su tipo mediante el uso del diagrama mostrado en la tabla 6.

Tabla 6. Diagrama de decisión RCM para definir tipología de acción de mantenimiento.



Fuente: Adaptado de Moubray J. mantenimiento centrado en la confiabilidad. Editorial Aladon. Año 2010. ⁴

Para utilizar el diagrama de decisión RCM, se entra en la parte superior y se define el impacto de la falla a clasificar según consecuencias a las persona (H), seguridad (S), medio ambiente (E) ó daño operacional (O). Después, según la columna elegida se siguen las respuestas a las preguntas del diagrama hasta lograr definir el tipo de falla.

⁴ ORTIZ Daniel. Año 2011. El método, diagrama de flujo RCM. Especialización en gerencia de mantenimiento. Bogotá. UIS.

4.1.1.4. Plan de gestión del mantenimiento y estimación de costos con el enfoque RCM.

El criterio base RCM para definir el plan de mantenimiento según este enfoque, es atacar las causa de las fallas relacionadas con consecuencias altamente impactantes para la empresa en análisis, en el aspecto ambiental, de seguridad, percepción de los clientes, calidad que es el estado deseado en mantenimiento. Con esto se tendrá un plan proactivo efectivo, que debe tener como condición adicional ser aceptable desde la óptica económica. Por ello, con el mapa de fallas priorizado disponible y clasificada cada falla a atender por tipo, se tiene mayor facilidad para asignar el modo de control a aplicar, mediante establecer las respectivas acciones de mantenimiento, definidas con la aplicación del enfoque RCM. Para definir la respectiva acción o acciones de mantenimiento ante una causa de falla, se tienen como fuentes de datos e información, los catálogos de los equipos y en especial a las llamadas tablas caza fallas que estos contienen.

Un detalle adicional a resolver, es la frecuencia de las acciones de mantenimiento según el enfoque RCM, para eso debe hacerse un análisis de costos. Con esto finaliza el proceso, al que ahora debe creársele la documentación que lo haga operativo, útil, ágil y con altas probabilidades de lograr las mejoras en la disponibilidad, que se pretende lograr al menor costo posible.

El criterio base para el análisis de costos, es que la acción de mantenimiento aplicada arroje unos valores económicos menores a las consecuencias de la fallas que se controlan en el sistema. De hecho, una opción es operar hasta la falla según expresa el enfoque RCM si ello es lo más conveniente desde la óptica técnico – económica, expresada como no tomar ninguna acción proactiva. Se observa en la tabla 7 que este tipo de evento solo ocurre en el análisis de las consecuencias operacionales o afectación a la producción.

4.1.2 Chasis de las grúas. La figura 2 presenta la visual De una de las grúas a analizar mediante el enfoque RCM.

Figura 2. Grúa international montada en camión plataforma.



Fuente: autor.

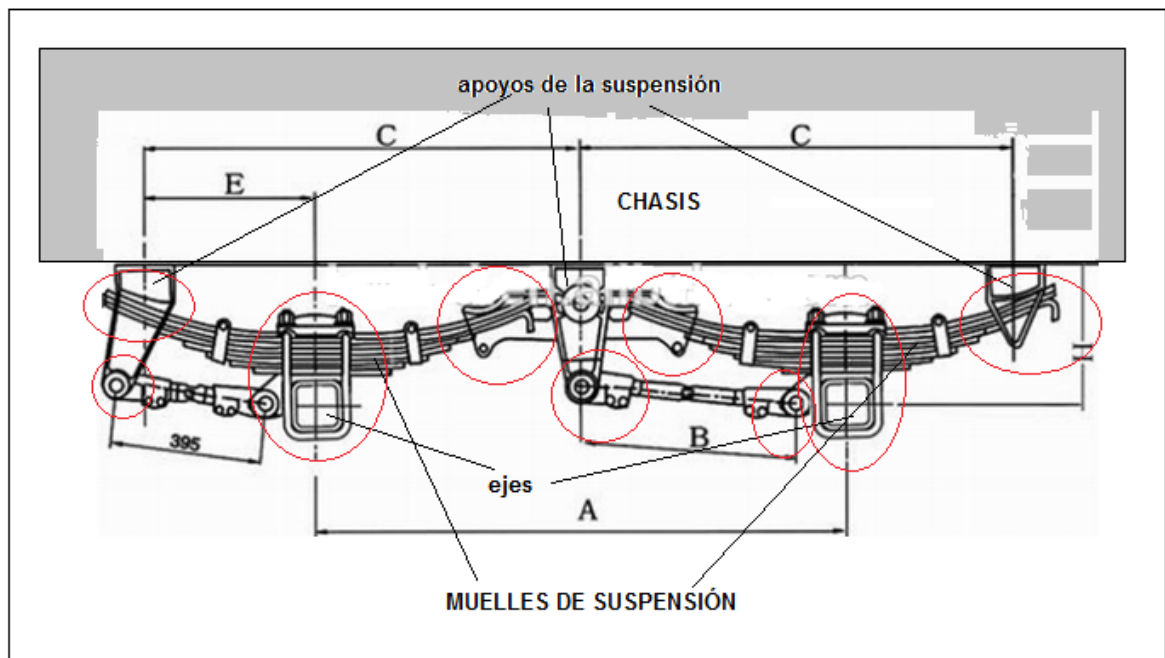
Se observa que la cabina, la plataforma, el eje de carga delantero y los dos ejes traseros se montan sobre el componente estructural llamado Chasis.

El chasis básicamente consiste en dos perfiles longitudinales de acero llamados los largueros y 7 perfiles transversales llamados puentes. Sobre este componente se montan los soportes de la cabina, la plataforma y los apoyos de los muelles de las suspensiones traseras y delantera. También los soportes del motor, la caja de velocidades y el eje de transmisión de potencia desde la caja de velocidades hasta el diferencial e igualmente los componentes de los sistemas de dirección, frenos y las instalaciones eléctricas y de freno neumático. Las fallas frecuentes son grietas,

roturas y desgaste de los componentes de apoyo, los cuales deben ser reacondicionados o sustituido según las posibilidades técnicas a mano.

4.1.3 Sistema de suspensión de las grúas. La suspensión de los ejes de carga delanteros y traseros de la grúa es del tipo muelles de ballestas u hojas. La figura 3 presenta el esquema de la suspensión trasera. Se muestran encerradas en elipses las zonas de desgaste típicas.

Figura 3. Muelle de hojas del camión.



Fuente. Catálogo Camión internacional 4300.

Los daños más frecuentes en el sistema de suspensión son:

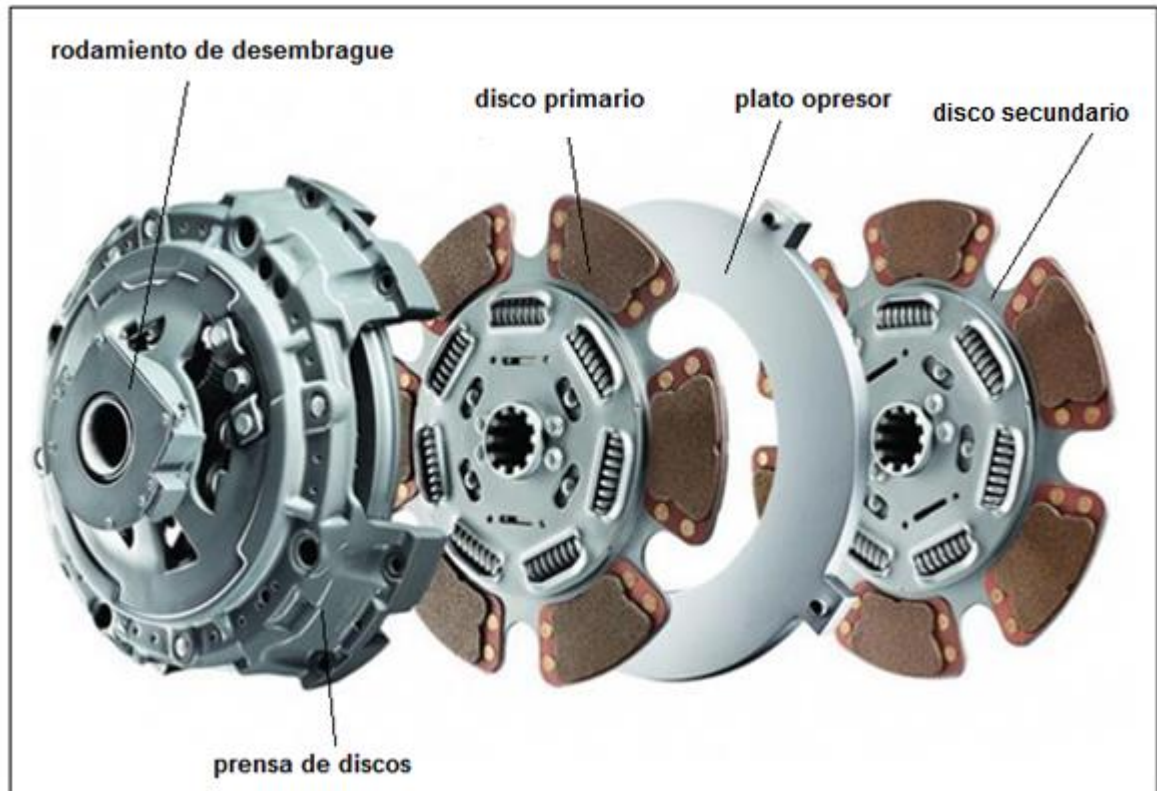
- Roturas de las guías del muelle. Requiere acción correctiva. Un trabajo que en promedio dura horas por muelle intervenido.

- Desgaste de pasadores y bujes de las platinas principales. Requiere sustitución de partes. Un trabajo que en promedio dura 2 horas por muelle.
- Rotura de platinas del muelle. Reparación correctiva. En promedio dura 4 horas por muelle.
- Rotura del eje suspendido. Trabajo correctivo. En promedio dura 2 días su reacondicionamiento o sustitución.
- Rotura o doblado de tensores de posicionado. Trabajo correctivo. En promedio dura una hora por tensor.
- Desgaste o rotura de los apoyos. Trabajo correctivo. En promedio dura entre 5 y 12 horas según dificultad o tipo de trabajo (reacondicionamiento o sustitución).
- Desgaste o agrietado de los balancines de los muelles. Trabajo correctivo de reacondicionamiento o sustitución. En promedio dura dos días cambiar cada balancín.

4.1.4 Sistema de embrague de las grúas. El sistema de embrague de estas grúas es de doble disco de cloche con forros de asbestos o amianto. La figura 4 presenta un embrague marca Spicer ®.

Este tipo de embrague consiste en una prensa de discos del tipo diafragma. Esta pieza es un tipo de resorte cónico especial el cual falla por agrietamiento. Derivado de la fatiga por el uso continuo de este componente de transmisión de potencia mecánica. La prensa además posee una masa metálica que comprime los discos contra el volante de inercia del motor (no mostrado), la cual sufre desgaste y distorsión con el uso frecuente a la cual está expuesta. Sobre una parte del diafragma se coloca un rodamiento del tipo empuje o axial el cual aplica sobre el diafragma para liberar los discos de la opresión de la prensa, momento en el cual ocurre el desembrague necesario para operar la palanca de cambio de velocidades. Este rodamiento es uno de los componentes con menor vida útil, por lo cual requiere cambios frecuentes.

Figura 4. Embrague mecánico de doble disco.

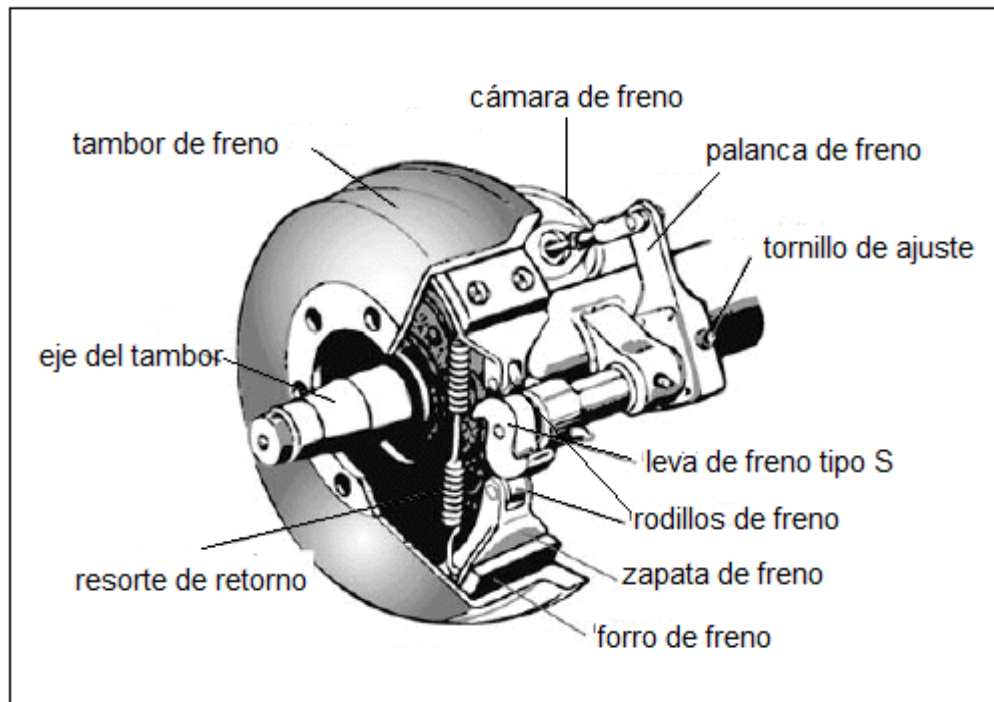


Fuente. Catálogo Camión internacional 4300.

Los dos discos de cloche son los componentes con mayor desgaste en el embrague. Cuando agotan su vida útil se pierde la capacidad de transmitir la potencia máxima y el vehículo solo pueda moverse a bajas velocidades. El cambio del sistema completo es un trabajo de sustitución de componentes y toma alrededor de dos días para resolverlo. Se debe tener cuidado que las piezas de recambio correspondan a repuestos originales para el equipo.

4.1.5 Sistema de frenos de las grúas. El sistema de frenos de las grúas, es de tipo neumático - mecánico. La figura 5 presenta el esquema de la parte mecánica que opera en los tambores o discos de frenos de una rueda.

Figura 5. Esquema de componentes mecánicos del freno de tambor para una rueda.



Fuente: WABCO (ed.) (2010) *Componentes de frenos neumáticos para vehículos remolcados a la normativa 71/320/CEE Catálogo esquemático para remolques descripción de sistemas de frenado y componentes de frenos neumáticos*. Recuperado de: <http://inform.wabco-auto.com/intl/pdf/815/00/34/8150400343.pdf>

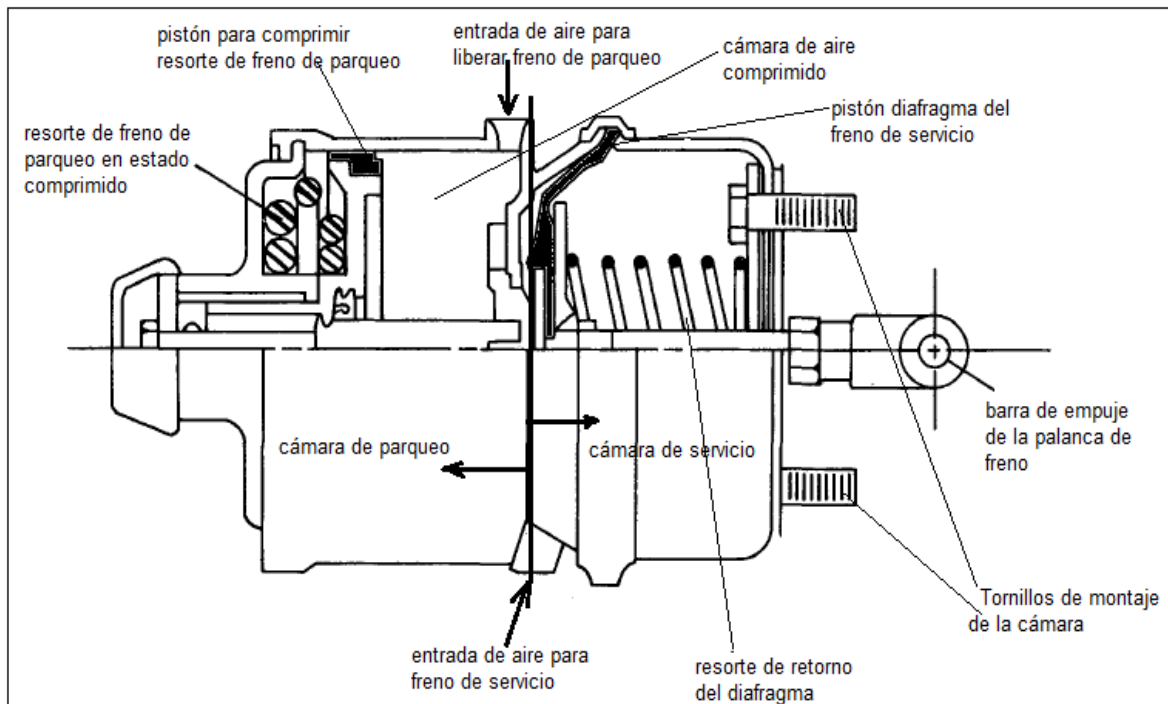
La figura 6 muestra el esquema de una cámara de frenado, que es un actuador que convierte la energía neumática en energía mecánica necesaria para accionar el freno en las ruedas. Observe las entradas de aire para frenado normal y para parqueo del vehículo. Cuando el conductor oprime el botón para liberar el parqueo del automotor, el aire desde los tanques de almacenamiento se dirige a la cámara de frenado doble oprimiendo el resorte de aplicación automática del freno de parqueo.

5

⁹ WABCO (ed.) (2010) *Componentes de frenos neumáticos para vehículos remolcados a la normativa 71/320/CEE Catálogo esquemático para remolques descripción de sistemas de frenado*

Observe el resorte de freno de parqueo en posición comprimida por la fuerza del aire comprimido que empuja el pistón, cuando el aire entra por el puerto de entrada de aire para liberar freno de parqueo. Los elementos que más se dañan son los sellos del pistón para la cámara de parqueo y el diafragma de frenado para la cámara de servicio.

Figura 6. Cámara de freno tipo doble función (parqueo y frenado normal).



Fuente: Fuente: WABCO (ed.) (2010) *Componentes de frenos neumáticos para vehículos remolcados a la normativa 71/320/CEE Catálogo esquemático para remolques descripción de sistemas de frenado y componentes de frenos neumáticos*. Recuperado de: <http://inform.wabco-auto.com/intl/pdf/815/00/34/8150400343.pdf>.

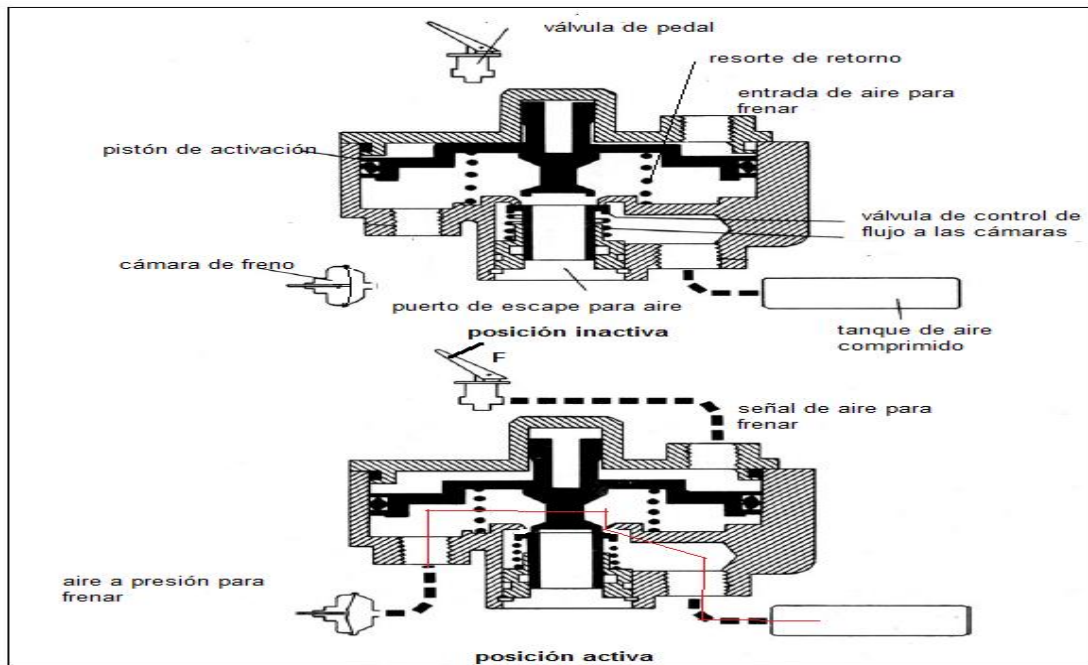
Estos sistemas de frenado por aire comprimido, requieren de un suministro de aire seguro, por lo cual los vehículos poseen varios tanques de acumulación a una presión normal de 100 a 120 psi. El aire se hace llegar a las cámaras de frenos, mediante conexiones de mangueras y tuberías, junto con varios tipos de válvulas

y componentes de frenos neumáticos. Recuperado de: <http://inform.wabco-auto.com/intl/pdf/815/00/34/8150400343.pdf>

de control del flujo, que además cumplen funciones complementarias de seguridad.

La figura 7 muestra una válvula Relays de aplicación pesada para este tipo de sistema de freno. Observe que en la posición inactiva el pedal de freno está libre de cualquier fuerza F que ocurre cuándo se oprime el pedal de frenar, viéndose que en este caso no existe flujo de aire a presión hacia las cámaras de frenado. Cuando se aplica la fuerza F sobre el pedal de freno, se envía una señal de aire para frenar, esto mueve el pistón de activación, logrando comunicar el puerto de aire del tanque con el puerto que se conecta con la cámara de frenado, con esto el freno detiene el giro de los tambores o disco y logra inmovilizar las ruedas del vehículo. La línea roja indica el flujo desde el tanque de aire comprimido a las cámaras de frenado cuando se activa el pedal de freno.

Figura 7. Válvula relays de frenado.

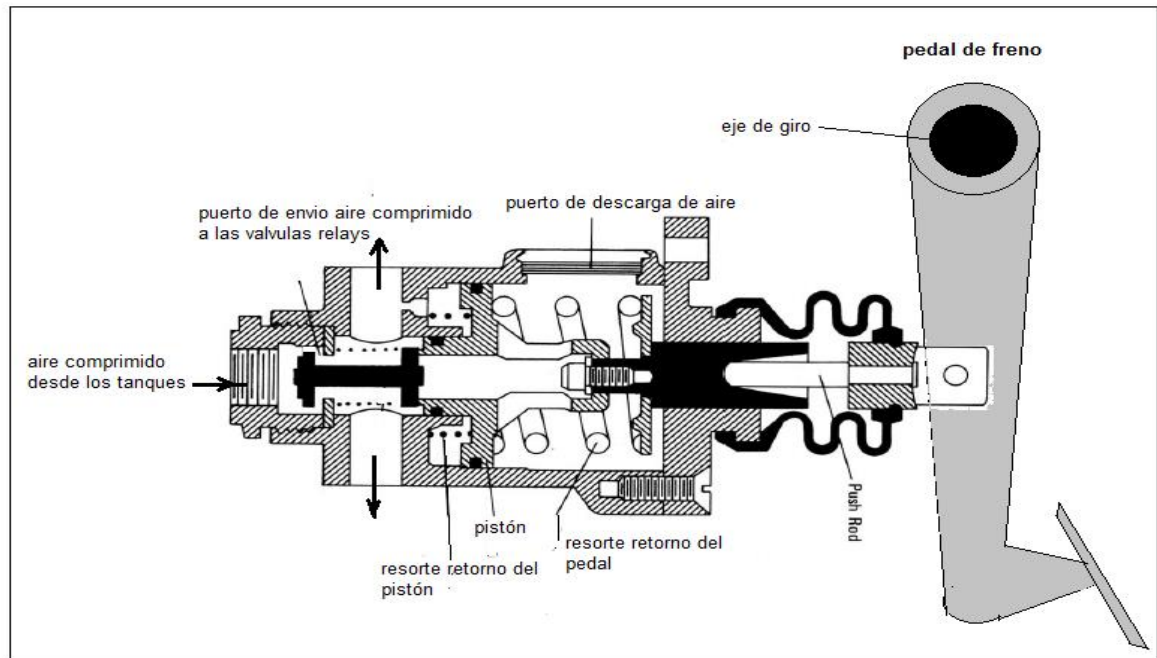


Fuente: WABCO (ed.) (2010) *Componentes de frenos neumáticos para vehículos remolcados a la normativa 71/320/CEE Catálogo esquemático para remolques descripción de sistemas de frenado y componentes de frenos neumáticos*. Recuperado de: <http://inform.wabco-auto.com/intl/pdf/815/00/34/8150400343.pdf>

La cámara puede abrirse para cambiar el diafragma del freno de servicio o el sello del pistón del freno de parqueo. El aire comprimido entra permanentemente a la cámara de freno de parqueo cuando el vehículo se mueve y entra a la cámara del freno de servicio solo cuándo el conductor oprime el pedal de freno.

La figura 8 muestra una válvula de pedal para realizar el accionamiento del sistema, activada por el conductor cuando oprime el pedal de freno del vehículo. Se muestra en posición activa donde el aire que entra desde el tanque de aire comprimido se dirige hacia las válvulas Relays para frenar el vehículo. Además, posee un puerto de descarga del aire comprimido una vez se suelta el pedal que es de amplia abertura para permitir una liberación rápida del freno.

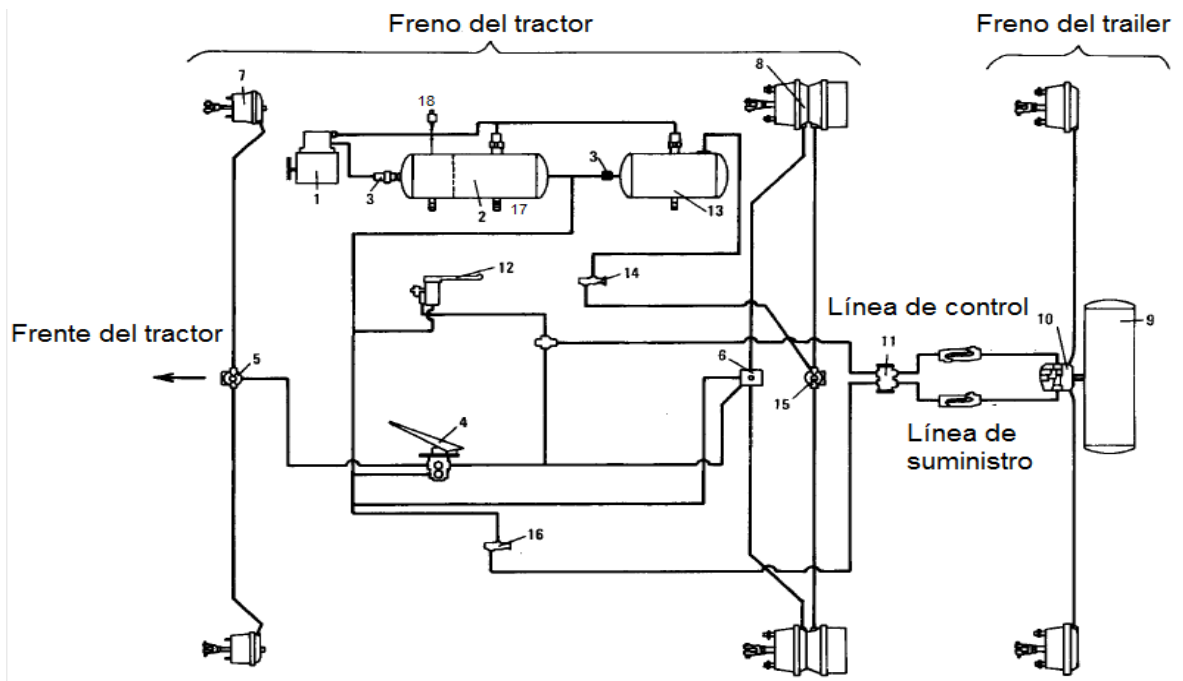
Figura 8. Válvula del pedal de accionamiento del freno.



Fuente: WABCO (ed.) (2010) *Componentes de frenos neumáticos para vehículos remolcados a la normativa 71/320/CEE Catálogo esquemático para remolques descripción de sistemas de frenado y componentes de frenos neumáticos*. Recuperado de: <http://inform.wabco-auto.com/intl/pdf/815/00/34/8150400343.pdf>

La figura 9 presenta el esquema de los componentes neumáticos del sistema en análisis.

Figura 9. Esquema de un sistema de freno neumático para un camión rígido de tres ejes.



Fuente: WABCO (ed.) (2010) *Componentes de frenos neumáticos para vehículos remolcados a la normativa 71/320/CEE Catálogo esquemático para remolques descripción de sistemas de frenado y componentes de frenos neumáticos*. Recuperado de: <http://inform.wabco-auto.com/intl/pdf/815/00/34/8150400343.pdf>

La tabla 7 define los componentes identificados por números en la figura 8 e indica su función dentro del sistema. Observaciones adicionales (columna observación) en la tabla sirven para tener datos sobre seguridad y mantenimiento.

Tabla 7. Descripción de componentes neumáticos de freno.

Numero	Componente	Función	Observación
1	Compresor de aire con regulador de presión embebido	Alimentar al sistema de aire comprimido a una presión regulada entre 90 y 120 psi.	Funciona conducido por el motor del vehículo
2	Tanque o Acumulador de aire	Almacena aire comprimido para seguridad de su	Su capacidad volumétrica de aire debe ser al menos

		disposición aunque temporalmente el compresor no funcione.	12 veces la que usa el sistema en una aplicación de freno. Existen al menos dos tanques. El primero conectado al compresor almacena aire y envía al segundo tanque. Este es el que envía aire a la válvula Relays para frenar el vehículo
3	Válvula anti retorno de aire	Asegura que el aire comprimido no se devuelva o escape por el compresor cuando el mismo no envía aireo está apagado	Al dañarse el compresor demora en cargar el aire del sistema de frenos y se descarga al apagar el motor
4	Válvula del pedal de frenos	Al pisar el pedal de freno envía una señal neumática a la válvula Relays para que frene el vehículo	Debe oprimirse paulatinamente el pedal. Su daño por fugas de aire desmejora la capacidad de frenado del sistema. Para controlar la humedad, los tanques disponen de válvulas de

			<p>purga en la parte inferior.</p> <p>El purgado puede ser manual o automático y debe hacerse para evitar la oxidación y daño prematuro de los tanques y demás componentes</p>
5	Válvula Relays de aplicación rápida	<p>Al recibir aire comprimido de frenado desde la válvula de pedal sella para que el mismo no fugue.</p> <p>Al soltar el pedal de freno permite el escape rápido del aire atrapado para liberar los frenos del tren delantero del tractor</p>	<p>Es de construcción sencilla pero de corta duración.</p> <p>El daño de esta válvula impide frenar correctamente el eje delantero del tractor</p>
6	Válvula Relays de aplicación pesada	Al recibir la señal de frenado desde la válvula de pedal envía aire comprimido de gran caudal hacia los frenos del eje o ejes traseros del tractor	Su daño desmejora en un 40 % la capacidad de frenado del vehículo
7	Cámara de frenado del eje delantero	Activa el sistema mecánico de frenado de las ruedas delanteras al recibir aire comprimido desde la válvula de	Es de tipo sencilla con un único diafragma que hace las veces de pistón de frenado.

		pedal.	Su daño frecuente es la rotura del diafragma de caucho de la misma
8	Cámara de frenado de los ejes pesados	Activa el sistema mecánico de frenado de las ruedas de los ejes pesados al recibir aire comprimido desde la válvula Relays de aplicación pesada.	Es del tipo de doble diafragma. Uno para el freno de servicio y otro para desactivar el freno de parqueo del vehículo
9	Tanque o acumulador de aire del freno del tráiler	Almacena aire comprimido que al aplicarlo a las cámaras de los ejes del tráiler frena al mismo	En los tráileres de modelo anterior al año 2000 eran de tipo sencillo. Hoy de manera obligatoria son de tipo doble
10	Válvula Relays del tráiler	Lleva aire desde los tanques del tractor al tanque del tráiler. También la señal de frenado del tráiler desde el pedal o desde la válvula manual 12. Otra función es actuar como dispositivo de emergencia en caso de ocurrir excesiva fuga de aire o rotura de la línea	Su daño desmejora en un 40 % la capacidad de frenado del vehículo

		del tráiler, caso en el cuál aplica automáticamente los frenos del tráiler	
11	Válvula de protección de frenado del tractor	Controla las líneas de servicio y control del tráiler Aplica automáticamente los frenos del tráiler si la presión cae por debajo de 40 psi	Si el tractor se separa del remolque automáticamente se sella
11 a	Acople de las líneas de aire tractor – remolque	Conectar el aire de suministro y el de control desde el tractor hacia el tráiler	
12	Válvula manual de control del tráiler	Desde la cabina permite al conductor enviar aire para frenar el tráiler y el tractor	Es auxiliar de la válvula de pedal en casos de emergencia Se aplica paulatinamente pero puede quedar en posición de aplicada Advertencia. Esta válvula no debe ser utilizada para parquear el tracto camión
13	Tanque de aire comprimido	Suministrar un amplio caudal de aire a las cámaras de freno para aumentar la rapidez de respuesta	Debe purgarse periódicamente el agua condensada
14	Botón del maxi o freno	Cuando es oprimido	No debe ser triado

	de parqueo	<p>envía aire a las cámaras de los frenos de los ejes traseros del tractor para que los frenos queden libres.</p> <p>Cuando es tirado (pull) corta el aire hacia las cámaras de frenado permitiendo que los resortes internos de frenado inmovilicen el camión.</p> <p>Cuando la presión de aire cae por debajo de 60 psi, inicia un proceso de fuga paulatina perceptible en la cabina para advertir al conductor que orille el vehículo.</p> <p>Al caer la presión por debajo de 40 psi automáticamente se dispara bloqueando los ejes e inmovilizando el vehículo</p>	con el vehículo andando. Peligro de causar roturas de los ejes
15	Válvula Relays de acción rápida	<p>Controla el flujo de aire hacia las cámaras del freno de emergencia</p> <p>Libera los resortes de manera rápida pero controlada</p>	

16	Botón maxi del tráiler	Controla el flujo de aire desde los tanques del tractor hacia el tráiler. En caso desconexión de las líneas de aire entre las dos partes, se cierra automáticamente impidiendo la descarga de los tanques de aire del tractor	
17	purgadores manuales de agua condensada	Permiten remover el aire acumulado dentro de los tanques	El retiro de agua controla la vida útil del tanque al evitar la corrosión por humedad
18	Válvula de alivio de la presión	Libera el exceso de presión en caso de que el regulador de presión del compresor falle	Debe existir al menos una por tanque

Fuente: autor.

El funcionamiento del sistema neumático de frenos, es el siguiente:

Al encender el motor del vehículo, éste mueve el compresor de aire, el cuál envía aire comprimido a los tanques o acumuladores de aire, los cuales al ser recipientes sometidos a presión tiene un valor de esta con la cual podrían explotar, por lo cual poseen el regulador de presión. La masa de aire acumulada aumenta con el tiempo de operación del compresor y la presión sube hasta el valor que el componente llamado regulador de presión permite según su calibración. Al llegar al valor de presión predefinida, el regulador impide que el compresor pueda seguir cargando los acumuladores pero que se mantenga una presión de operación segura. Si por alguna razón el regulador de presión falla y la presión sube sin

control, el sistema tiene normalmente en los tanques, unas válvulas de alivio de presión, que liberan el exceso a la atmósfera si este evento ocurre. Adicionalmente, en la cabina el conductor tiene un manómetro de presión que indica el valor de la misma y posee además de la escala, rangos de colores para advertir de baja presión (color amarillo), normalidad (color verde) o exceso de la misma (color rojo).

En estos momentos el vehículo aun esta inmóvil. Luego de tener la presión de trabajo normal, el conductor debe liberar el freno de estacionamiento o maxi para movilizarse. Para esto, el vehículo en la cabina de conducción, posee un botón de freno de parqueo que se desactiva oprimiéndolo. Al liberar los frenos en cada rueda, estos quedan liberados y el vehículo y ya se puede mover. Ahora el conductor conduce su vehículo hasta que eventos como hacer escuadras, reducir la velocidad o detener el automotor por cualquier razón, requiere que active el sistema neumático de frenos. Para causar el frenado, el conductor aprieta con el pie el componente llamado válvula de pedal. Al activar esta válvula el aire comprimido en los tanques fluye a través de ésta hasta las válvulas de Relays, las cuales al recibir la señal de frenado, envían un gran caudal desde los tanques hacia las cámaras de frenado, las cuales crean una fuerza, convertida en un par por la palanca de frenado, con el cual se activa un eje de leva que hace que una leva tipo S al girar pueda oprimir las zapatas de los frenos o las pastillas contra los tambores y/o discos giratorios y convierta la energía cinética del vehículo en calor disipado a la atmósfera, más la detención segura del vehículo. Al soltar el conductor el freno, la válvula de pedal libera la señal de frenado hacia las válvulas Relays y las cámaras de frenado, descargando el aire atrapado en la frenada hacia la atmósfera, quedando el vehículo libre para reiniciar la marcha.

El sistema descrito es de tipo doble para mayor seguridad. Puede decirse que las ventajas de estos frente su par de tipo hidráulico, son; menores presiones de trabajo, fluido de trabajo limpio por ser el aire, no toxico y sin costo. En operación

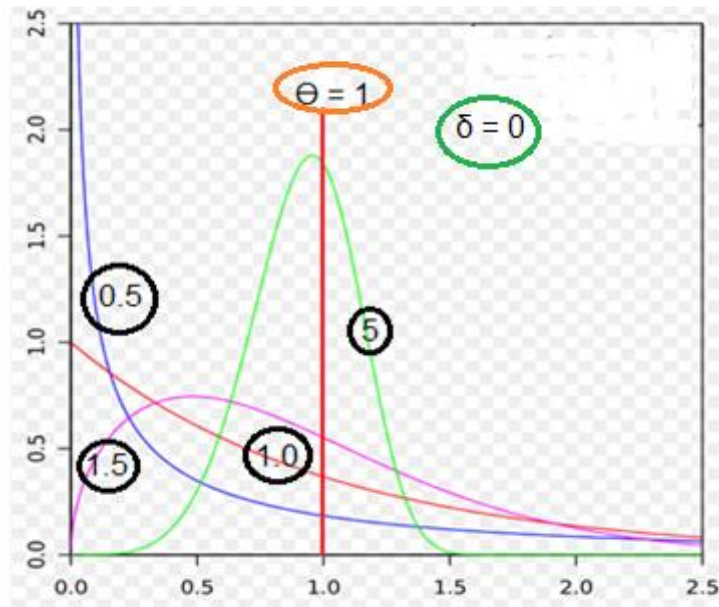
son ayudados por el sistema complementario llamado freno motor que también debe estar operable para tener el correcto desempeño.

4.1.6 i. Distribución de Weibull. La distribución de Weibull, es uno de los diversos modelos de distribución estadística de la probabilidad. Para análisis de mantenimiento, la variable estadística analizada es el tiempo de falla de componentes o sistemas. Las características que la hacen idónea para aplicar en el análisis estadístico de datos para analizar el accionar del mantenimiento, son:

- Posee un parámetro de inicio o umbral δ , que indica la probabilidad del tiempo en que ocurra la primera falla, de un determinado tipo, que posee comportamiento de variable aleatoria. Este parámetro es exclusivo de este modelo estadístico y lo hace apropiado para su aplicación a la gestión del mantenimiento.
- Posee un parámetro llamado de forma α , que le permite ajustarse a cualquier histograma de datos y la convierte en un modelo universal.
- Posee un parámetro de escala Θ , con percentil de 63.2%, que define la probabilidad de falla a partir de la ocurrencia del valor umbral. Un valor de 30 horas para este parámetro, indica que ocurrirá el 63.2 % de las fallas dentro de las 30 horas siguientes, después de alcanzar la primera falla el valor del parámetro umbral.
- Para valor del parámetro de forma igual a 3, el perfil de la distribución de probabilidad se convierte en la distribución normal y para el valor de 1 en la distribución exponencial.

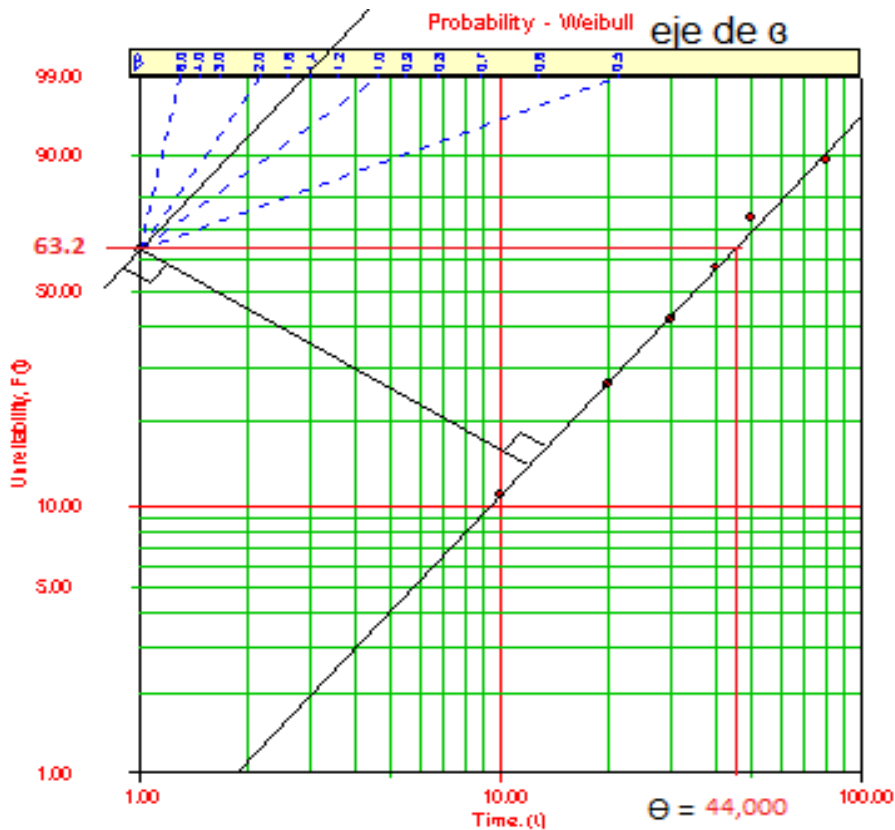
La figura 10 presenta la forma que puede adquirir una distribución de Weibull en función de valores de sus parámetros. La forma de la distribución, define el perfil de comportamiento de los datos analizados y permite cuantificar su comportamiento estadístico.

Figura 10. Formas de distribuciones de Weibull.



La figura 11 presenta el papel Weibull utilizado para determinar de forma gráfica, los parámetros de la función partir de los datos de fallas registrados para el sistema particular.

Figura 11. Datos representados en papel Weibull.



Una manera aproximada de trazar la recta de ajuste, es tomar los dos puntos extremos y unirlos por una línea. Después, observar el grado de aproximación y simetría de los puntos restantes, respecto a esta línea, dibujada en el papel de la distribución estadística seleccionada, en este caso el de Weibull. Los puntos indicados sobre la línea recta en papel Weibull, son los correspondientes a los datos de fallas registrados. El gran acercamiento de los puntos a la línea recta, indican una gran validez de la distribución Weibull respecto a los mismos. Además, se determinan los valores de los parámetros β y Θ . Para determinar el parámetro de inicio δ , se tiene en cuenta lo siguiente.

- Si los puntos al inicio llamados de cola caen sobre la línea recta de regresión, entonces el parámetro de inicio es diferente de cero. Si todos caen sobre la recta o muy aproximados, entonces su valor es cero. También si el valor

de β es mayor a 9, esto indica que el parámetro de inicio es mayor que cero y debe estimarse.⁶

La ecuación 2 expresa el modo para determinar la función de densidad de probabilidad de falla $f(t)$, para el modelo de Weibull en relación a la variable aleatorio, el tiempo t .

Ecuación 2

$$f(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t-\delta}{\theta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\delta}{\theta} \right)^{\beta}}$$

La ecuación 3 expresa la función acumulada de probabilidad para la falla $F(t)$ del modelo de Weibull.

Ecuación 3

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

La ecuación 4 expresa la función acumulada de probabilidad para la confiabilidad $R(t)$ del modelo de Weibull.

Ecuación 4

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

La ecuación 5 expresa la función de tasa de falla en el tiempo $\lambda(t)$ del modelo de Weibull.

¹⁰ DIETSCHE, Karl-Heinz (ed.) (2005) *Manual de la técnica del automóvil*. Berlín: Robert Bosch GmbH.

De las ecuaciones, se observa que se tienen funciones matemáticas de cada una de ellas respecto al tiempo. Por ello, se tiene diversos perfiles a interpretar en cada caso.

Ecuación 5

$$\lambda(t) = \frac{\theta}{\theta} \left(\frac{t - \delta}{\theta} \right)^{\theta - 1}$$

La distribución de frecuencia, necesaria para colocar los puntos en cualquier tipo de papel, se define mediante el siguiente tipo de ecuaciones, mostrado en la tabla 8.

Tabla 8. Ecuaciones para frecuencia acumulada.

N	F (i)
50	$F(i) = \frac{i}{n}$
(20 – 50)	$F(i) = \frac{i}{n+1}$
n < 20	$F(i) = \frac{(i-0.3)}{(n+0.4)}$

Fuente: autor.

Dónde.

F (i) = valor posicional del punto i de los datos, respecto al número total de datos n. El valor de i asciende discretamente desde 1 hasta n.

n = número de datos de la muestra a modelar.

Los puntos o datos i, se ordena de menor a mayor y su posición denota la frecuencia acumulada. Por ello, se construye una tabla con los datos ordenados ascendientemente y numerados desde el 1 hasta n. Después, según el valor de n definido por la tabla 9, se asigna el respectivo valor F(i). Para el caso n = 20, F(i) del punto 1, es 0.0476, (1/21), etc.

4.2 MARCO CONCEPTUAL

4.2.1 Causas de la falla. Factores de tipo físico, químico u otros, que llevan a la falla a un componente de máquina, sea éste: mecánico, eléctrico, electrónico o software. Controlando las causas se evita el desarrollo de los eventos de falla.

- **Consecuencias de la falla.** Impacto negativo que aparece con la ocurrencia de alguna falla a nivel de costos, de seguridad o medio ambiental. RCM se enfoca en atender las fallas con mayores consecuencias mediante el control de sus causas.
- **Consecuencias ambientales.** Se presenta el impacto negativo si al ocurrir la falla se infringe alguna legislación ambiental interna o legal.
- **Consecuencia de fallas ocultas.** Se presenta este impacto cuando las consecuencias derivan de causas ocultas o desconocidas. Ocurren normalmente cuando fallan los sistemas de protección sin seguridad inherente.
- **Consecuencias operacionales.** Cuando la falla ocurre afecta la productividad, la calidad, la atención al cliente. Tiene costos para realizar las reparaciones y las de lucro cesante.
- **Consecuencias no operacionales.** No afectan la seguridad ni la producción. Solo causan costos de reparación.
- **Consecuencias a la seguridad.** Cuando la falla ocurre se afecta la integridad física parcial o total de personas.

- **Detección de la falla.** Facilidad o dificultad del sistema para localizar el componente dañado.
- **Efecto de la falla.** Evento físico que se observa en el equipo o parte del mismo cuando ocurre la falla de alguno de sus componentes.
- **Falla funcional.** Estado del equipo en el cual no es posible entregar los requerimientos estándar de desempeño.
- **Función.** Resultado o servicio que el equipo entrega al usuario para satisfacer o resolver una necesidad o deseo empresarial o personal.
- **Posibilidad de ocurrencia.** Medida de la ocurrencia de una falla determinada. Es uno de los factores que sirve para priorizar la atención a las consecuencias de las fallas.
- **Tarea a condición.** Acción de mantenimiento preventivo que define la intervención previa inspección del estado operativo del componente o equipo.
- **Tareas proactivas.** Son acciones de mantenimiento que RCM define como reacondicionamiento cíclico, sustitución cíclica y mantenimiento a condición. Se aplican antes que ocurra la falla. Son de tipo preventivo y predictivo.
- **Tareas a falta de (acciones proactivas aplicables).** Son acciones de mantenimiento que se aplican después que ocurre la falla para que la misma no se repita. RCM las define tareas de búsqueda de fallas (análisis causa – raíz y otros), rediseño o ningún mantenimiento programado.

5. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

5.1 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA EN ESTUDIO

Se analizan 10 grúas de la marca international. La tabla 9 define cada vehículo del parque automotor a analizar. El anexo 1 evidencia mediante registro fotográfico resultados de la auditoría realizada a los vehículos.

Tabla 9. Listado de vehículos del parque analizado.

PLACA	CILINDRAJE	TIPO	MARCA	COMBUSTIBLE	MODELO
T-9183	4700	GRUA	INTERNATIONAL	A.C.P.M	1998
T-8452	7630	GRUA	INTERNATIONAL		1998
T-8441	7300	GRUA	INTERNATIONAL	A.C.P.M	2000
T-8440	7300	GRUA	INTERNATIONAL	A.C.P.M	1999
T-1165	4200	GRUA	INTERNATIONAL	A.C.P.M	2005
T-1166	4200	CANASTA	INTERNATIONAL	A.C.P.M	2005
T-0788	7630	GRUA	INTERNATIONAL	A.C.P.M	1994
T-0764	7630	CANASTA	INTERNATIONAL	A.C.P.M	1995
T-9178	4700	GRUA	INTERNATIONAL	A.C.P.M	1998
T-0757	7630	GRUA	INTERNATIONAL	A.C.P.M	1994

Fuente: autor.

Existen modelos del año 1994 hasta 2005. Por lo tanto, son equipos con tiempos de servicio entre 23 y 12 años. Por ello, todos están fuera del periodo de garantía que expide el fabricante de la marca.

El departamento de mantenimiento maneja una lista de chequeo que se muestra en la tabla 10. El personal del departamento cuenta con operarios calificados, que son: 4 mecánicos, 3 electricistas, 3 soldadores. Además, se tiene el apoyo de 7 ayudantes. Los operarios poseen nivel certificado de técnicos y los ayudantes son jóvenes en proceso de formación en el Sena. También se tiene un almacén de

La tabla 11 define los resultados obtenidos de aplicar la lista de chequeo actualmente existente.

Tabla 11. Resultados de aplicar la lista de chequeo.

1	Una vez realizado el diagnóstico se concluye que de los 10 vehículos estudiados se presenta los siguientes daños:		
2	LUCES DEL VEHICULO		
3		CANTIDAD	NIVEL PORCENTUAL(%)
4	Farola derecha	2	20%
5	Farola izquierda	3	30%
6	Direccionales delanteros	2	20%
7	Direccionales Traseros	1	10%
8	Stop derecho	3	30%
9	Stop izquierdo	2	20%
10	Luz de Reversa	2	20%
11	Luz de Parqueo	4	40%
12	ASESORIOS		
13			
14	Plumillas limpiavidrio	6	60%
15	Deposito agua limpiavidrio	7	70%
16	Deposito expansion radiador	5	50%
17	Tapa de radiador	6	60%
18	Tapa de llenado de aceite	4	40%
19	Varilla medidora de aceite	2	20%
20	Tapa de llenado de combustible	8	80%
21	Retrovisor derecho	4	40%
22	Retrovisor izquierdo	3	30%
23	Retrovisor central interno	9	90%
24	Pito	6	60%
25	Cinturones de seguridad	4	40%
26	Recibidor cinturon de seguridad	8	80%
27	Bateria	5	50%
28	Freno de mano o emergencia	2	20%
29	Manija elevavidrio puerta delatera derecha	7	70%
30	Manija elevavidrio puerta delatera izquierda	6	60%
31	INDICADORES		
32			
33	Nivel de aceite	6	60%
34	Nivel liquido de frenos	5	50%
35	Nivel de combustible	4	40%
36	Nivel de Temperatura	7	70%
37	Medidor de velocidad	5	50%
38	Nivel de agua vasos de bateria	5	50%

39	DOCUMENTOS		
40	Tarjeta de propiedad	3	30%
41	SOAT	2	20%
42	Revisión Tecnomecánica	2	20%
43			
44	MANTENIMIENTO		
45			
46	Cambio de aceite acorde kilometraje	7	70
47	Kilometraje:		
48	TAPIZADO		
49			
50	Cojinería	3	30
51	Tapizado puertas	5	50
52	Tapizado techo	7	70
53	LLANTAS		
54			
55	Labrado de llantas	5	50
56	Labrado llanta de repuesto	9	90
57	Calibración de llantas	3	30
58	VIDRIOS		
59			
60	Panorámico delantero	2	20
61	Panorámico trasero	1	10
62	Vidrio puertas delanteras	4	40
63	PRESENTACION		
64			
65	Pintura vehículo	7	70
66	Latonería vehículo	8	80
67			

Fuente: empresa.

El análisis a la lista de chequeo actual y los resultados obtenidos, son.

- Se contemplan acciones preventivas de tipo legal (tarjeta de propiedad, revisión técnico mecánica, seguros SOAT, estado de palcas, vidrios, pintura y latonería).

- Se revisan de manera preventiva, mediante inspección, componentes e insumos de los vehículos, que deben estar en normal estado operativo, para facilitar el uso, pero estos aspectos revisados no están relacionados con las fallas de tipo correctivo que en el año 2016 causaron 50 órdenes de servicio no atendidas y tampoco con las 28 sucedidas que aparecen en los registros del año 2017.
- Al no existir relación entre las acciones preventivas definidas en la lista de chequeo y las fallas correctivas ocurridas, tampoco existen actividades de mantenimiento preventivo que las controlen, lo cual define un campo de acción para generar el plan de mantenimiento preventivo basado en algún tipo de enfoque de mejora u optimización.
- La lista de chequeo permite controlar los aspectos básicos que deben seguir aplicándose, pero por parte de los conductores, no del personal de mantenimiento. Actualmente lo que ocurre es que el personal de mantenimiento revisa periódicamente los fines de semana los aspectos definidos en la lista de chequeo, lo cual no es lo más acertado para lograr un control efectivo. Se propone entregar la lista de chequeo a cada conductor y recogerla diariamente al finalizar la jornada u otra acción semejante, para tomar la respectiva acción correctiva a criterio de la carga de trabajo y la dificultad de la operación, según se maneje desde el departamento de mantenimiento. Algunas de estas, en el nuevo enfoque, se asignan para que las realicen los conductores y no el personal de mantenimiento. Por esto, es posible que sea necesario aplicar algún tipo de entrenamiento a los conductores.
- En la lista de chequeo existente, no es clara la frecuencia con la cual debe realizarse cada revisión. Para los indicadores de operación del vehículo, la revisión debe ser diaria, pero para el labrado de las llantas debe ser semanal e

incluso no solo revisar la profundidad del dibujo, también la forma de desgaste debe tenerse en cuenta.

- En relación al cambio oportuno de aceite, se observa un descuido grave que debe corregirse. Lo primero es identificar la cadena de sucesos para que de los 10 equipos, 7 presentan retraso en tan importante acción de mantenimiento preventivo que define la vida útil de los motores y en caso de no realizarse en el tiempo oportuno, reduce la duración normal de los motores, que deben superar los 300.00 kilómetros según el fabricante.[5].
- La lista de chequeo, aunque contiene los aspectos que son básicos para revisar, no define las frecuencias, la duración, quien realiza la acción y que procedimiento se debe aplicar si ello es pertinente.
- Existe el aspecto de la documentación de los vehículos, que debe ser responsabilidad del conductor, pero que debe revisar la gerencia de mantenimiento, para ello se puede activar en Excel, alarmas para identificar con 15 días de anticipación, el vencimiento de documentos como el seguro obligatorio SOAT y la revisión técnico mecánica.

7

5.1.1 Propósito del plan RCM. La revisión del actual accionar de mantenimiento, requiere ajustar las acciones de mantenimiento preventivo actuales, lo que por una parte, deriva en ajustar la lista de chequeo actual. De otro lado, se deben crear las acciones de mantenimiento preventivo complementarias, que controlen las fallas correctivas que se han presentado, las cuales no existen actualmente y son necesarias para el control requerido del actual perfil de fallas correctivas.

⁵ BIVONA E. Año 2005. "Evaluating Fleet and Maintenance Management Strategies through System Dynamics Model in a City Bus Company".

Para realizar el plan de mantenimiento nuevo, de manera lógica y sistemática, se emplea el enfoque RCM. El propósito de aplicar este enfoque, es lograr optimizar las acciones a aplicar, teniendo en cuenta el contexto de operación de los vehículos, mediante la definición y análisis de su historial de fallas correctivas existentes y el costo estimado del accionar de mantenimiento para un año de operación. El desarrollo de este enfoque, es lo que se contempla en las fases de desarrollo de un plan de mantenimiento definidas en la metodología RCM, por lo cual se selecciona enfoque. Se trata de minimizar los costos de mantenimiento preventivo más los correctivos, con base en la información que se desarrolla en el proyecto.

Para desarrollar la aplicación del enfoque RCM, se define una primera fase de análisis cualitativa según esta metodología de acción. Posteriormente, de manera complementaria se plantea un modelo cuantitativo de costos basado en el perfil de fallas de la flota, correspondiente, para ajustar la frecuencia de las actividades propuestas, según el contexto operacional de los equipos, para lograr la pretendida optimización del plan de mantenimiento propuesto.

5.2 DEFINICIÓN DEL CONTEXTO OPERACIONAL DE LOS EQUIPOS

Las grúas operan en la región Caribe de Colombia. Se transita en vías en buen estado y también vías en mal estado, con resaltos y huecos de variados tamaños. Cada vehículo tiene un conductor asignado y los servicios diarios a atender. La empresa posee talleres propios, dónde se resuelven los daños de componentes del chasis, la carrocería y el tren de potencia. Al trabajar durante los 12 meses de un año, los vehículos están expuestos a lluvia, polvo, arroyos, vías en mal estado, entre otras condiciones extremas. Estas condiciones operativas se definen en el manual de operación y mantenimiento preventivo del fabricante como condiciones

extremas que requieren ajustar el programa de mantenimiento, bajo el enfoque de gama de mantenimiento, expresado en función del número de miles de kilómetros recorridos por cada vehículo, que los fabricantes de automotores entregan al propietario o usuario final.

Uno de los aspectos claves en relación al proyecto, es el análisis y control del comportamiento de las fallas correctivas, según cada sistema crítico a analizar. Este es el aspecto al que se aplica el énfasis en relación al contexto operacional y el comportamiento derivado, dado que es el soporte del análisis cuantitativo para optimizar los costos del accionar de mantenimiento, para definir la disponibilidad requerida.

Los automotores operan en la ciudad de Barranquilla. Los datos pertinentes, son:

- Temperatura promedio. 27.4°. Según IDEAM.
- Temperatura mínima. 35° C.
- Temperatura máxima. 20 ° C
- Humedad relativa promedio.
- Localización geográfica. Latitud: 10° 59' 16" N; Longitud: 74° 47' 20" O.
- Altitud. 18 metros sobre el nivel del mar.
- Velocidad máxima en calles de barrios 40 km/h.
- Velocidad máxima en vía circunvalar. 80 km/h.
- Meses de lluvia. Abril, mayo. Agosto, septiembre, octubre, noviembre.

5.2.1 Perfil estadístico de fallas correctivas. El perfil de las fallas correctivas, se determina para cada sistema crítico, mediante el estimado de los parámetros de Weibull a partir de los datos respectivos, por cada sistema analizado. El anexo 3 presenta el procedimiento gráfico, utilizando papel Weibull, para determinar el valor de los parámetros correspondientes.

- **Perfil estadístico de fallas para el sistema de frenos.**

Para desarrollar el perfil de fallas para el sistema de frenos, se organizan los datos correspondientes, según la tabla 12.

La columna izquierda indica la secuencia con la cual ocurren las fallas en el sistema de frenos del parque de grúas. La columna Tpf (tiempo para la falla), indica el número de kilómetros recorridos para que se presente la falla por cada ⁸vehículo. La columna de la derecha presenta el dato de frecuencia acumulada para cada evento de falla ocurrida.

Tabla 12. Datos de falla para el sistema de frenos.

N° fallo I	Tpf (km)	F (t) $\frac{i - 0.3}{n + 0.4}$
1	3500	6.7
2	4500	16.3
3	6000	25.9
4	7200	35.5
5	9000	45.1
6	11000	54.8
7	14000	64.4
8	18000	74
9	32000	83.6
10	37000	93.2

Fuente: empresa.

Para la construcción de la figura 11, se han tomado los datos de la columna derecha de la tabla 12 y se colocan en el eje de las Y y los de la columna central

⁶ CRESPO E. Año 2008. Optimización Estocástica del Mantenimiento de Sistemas de Transporte y Secado de Sustancias Minerales. Universidad Politécnica de Madrid. Tesis doctoral.

en el eje de las X. Cada par de datos según el orden de la columna izquierda, define un punto en la figura. El mismo procedimiento se aplica a los otros sistemas críticos en análisis.

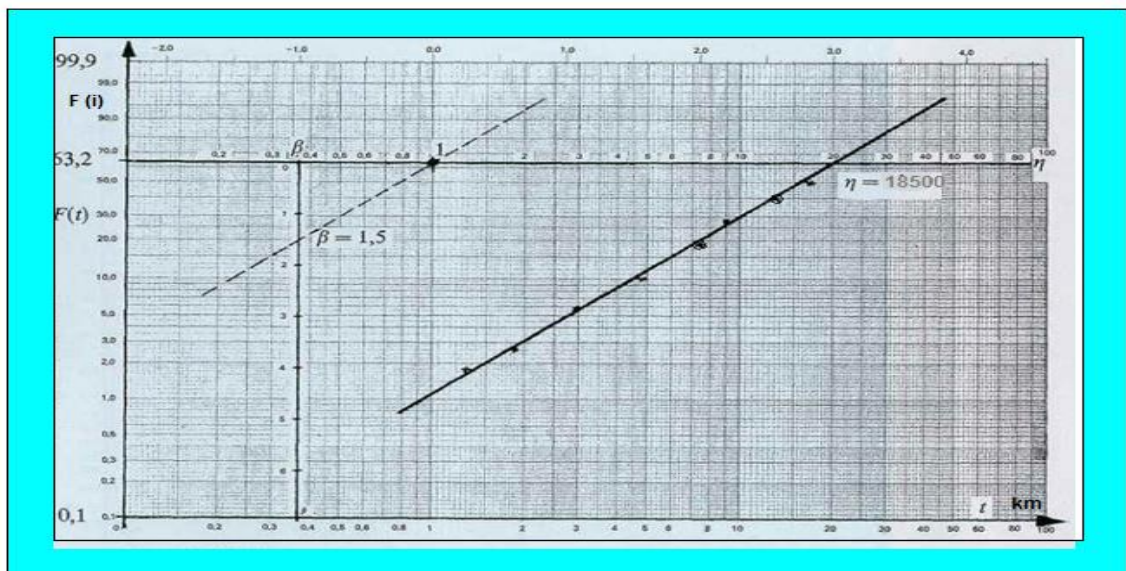
Utilizando papel Weibull, se definen los valores de los parámetros de la distribución. La figura 12 presenta la distribución de Weibull para las fallas de los frenos en el parque de grúas. Al graficar en papel Weibull los datos y unirlos, resulta una línea recta, lo cual indica que existe un valor del parámetro δ igual a cero.

Los valores estimados de los parámetros del modelo Weibull, para el sistema de frenos, son.

$$\beta = 1.5$$

$$\Theta = 18500 \text{ km.}$$

Figura 12. Distribución Weibull para el sistema de frenos.



Fuente: autor.

- **Perfil estadístico de fallas para el sistema de suspensión.**

La tabla 13 presenta los datos de fallas Weibull para el sistema de suspensión. La figura 13 presenta los datos en papel Weibull. En este caso, el ajuste visual de la línea recta, indica que el parámetro de inicio $\delta = 0$.

$$\epsilon = 1.26$$

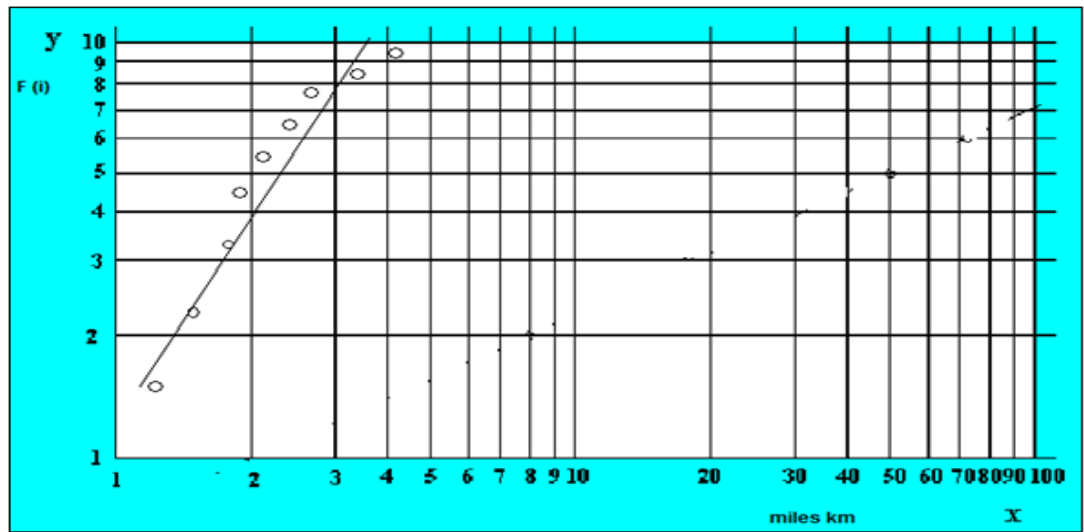
$$\Theta = 23500 \text{ kms.}$$

Tabla 13. Datos de falla para el sistema de suspensión.

N° fallo	Tef (km)	F (t)
1	10400	6.7
2	11980	16.3
3	13740	25.9
4	15740	35.5
5	18060	45.1
6	20790	54.8
7	24140	64.4
8	28460	74
9	34540	83.6
10	44940	93.2

Fuente: empresa.

Figura 13. Distribución Weibull para el sistema de suspensión.



Fuente: autor.

- **Perfil estadístico de fallas para el sistema de embrague.**

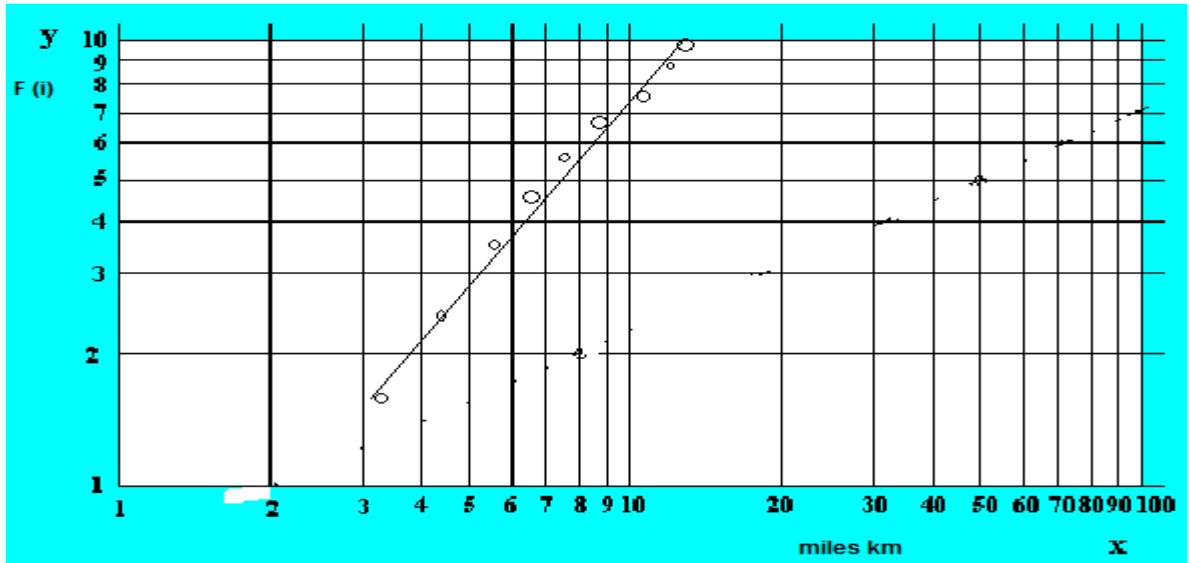
La tabla 13 presenta los datos de falla para el sistema de embrague.

Tabla 14. Datos de falla para el sistema de embrague.

Nº fallo	Tef (km)	F (t)
1	24400	6.7
2	33500	16.3
3	43200	25.9
4	53500	35.5
5	64600	45.1
6	76600	54.8
7	89700	64.4
8	104000	74
9	119800	83.6
10	137400	93.2

Fuente: empresa.

Figura 14. Distribución Weibull para el sistema de embrague.



Fuente: autor.

Los valores de los parámetros para el sistema de embrague, son.

$$\delta = 0$$

$$\sigma = 1.12$$

$$\Theta = 83.500 \text{ km.}$$

Estos modelos de Weibull y los valores de sus parámetros respectivos, para cada sistema crítico analizado, servirán más adelante en los modelos de costos propuestos, para optimizar las frecuencias de las tareas de reacondicionamiento cíclicos para los mismos, asignando un grado de probabilidad a los resultados estimados.

5.3 ANÁLISIS FMEA

Se aplica la metodología FMEA a los sistemas críticos identificados, no atendidos por el accionar preventivo actual, para identificar las causas o modos de falla a atender. La tabla 15 define el resultado del análisis.

Tabla 15. Tabla FMEA para el parque de grúas.

SISTEMA	Función	Falla funcional	Efecto de la falla	Modo de falla
SISTEMA DE FRENOS. COMPONENTES	Detener la grúa a la distancia de fábrica según la velocidad y carga	No detener la grúa según estándares	NA	NA
Bandas de freno trasera	Crear la fuerza de fricción para detener el vehículo en distancia estándar.	<ul style="list-style-type: none"> Baja fuerza de fricción. 	<ul style="list-style-type: none"> Vehículo frena erráticamente Trabamiento del freno. Trabamiento del freno. Excesiva distancia de frenado Desgaste desigual de llantas. Ruidos al frenar. Olor a quemado al frenar. Escape de aire. Carga lenta o nula de aire. 	<ul style="list-style-type: none"> Desgaste normal. Agotamiento de la vida útil de las bandas. Desgaste anormal. Posicionado incorrecto de las bandas. Rotura de remaches de las bandas.
Bandas de freno	Crear la fuerza			

delanteras.	de fricción para detener el vehículo.			
Bujes eje de levas	Posicionar el eje de la leva de frenado	Pérdida de fuerza de frenado	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste desigual de las bandas de frenado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de lubricación de bujes. , • Incorrecto ajuste de bujes.
Rodajas de freno	Trasmitir la fuerza de frenado del eje de levas a las bandas.	Pérdida de fuerza de frenado.	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste desigual de las bandas de frenado. • Perdida del poder de frenado de la rueda afectada 	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño incorrecto de las rodajas.
Diafragmas de freno principal	Convertir la presión del aire comprimido en fuerza de frenado.	Pérdida de fuerza de frenado.	<ul style="list-style-type: none"> • Fuga de aire perceptible por el ruido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aceite en el diafragma. • Excesivo recorrido del diafragma. • Perforado por rotura del resorte
Sellos del vástago de conexión	Pedir el paso de aire de la cámara de parqueo hacia la cámara de frenado principal.	Permitir fugas de aire.	<ul style="list-style-type: none"> • Frenado involuntario del automotor. • Recalentamiento de las partes de fricción. 	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosión del vástago. • Agotamiento de vida útil del sello. • Presencia de aceite en el sello.
Diafragmas de freno parqueo				
Resortes de parqueo	Aplicar la fuerza del resorte para bloquear los frenos.	Imposibilidad de aplicar la fuerza para parqueo.	<ul style="list-style-type: none"> • Vehículo con pérdida de capacidad de parqueo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosión del resorte. • Agotamiento del ciclo de vida del resorte.
Rachet de frenos	Convertir la fuerza de frenado del	No convierte la fuerza en torque de giro.	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de poder de frenado en la 	<ul style="list-style-type: none"> • Rachet con tornillo dañado. • Agotamiento de la

	diafragma en torque para girar el eje de levas.		rueda afectada.	vida útil del Ratchet.
Válvulas de descarga rápida	Enviar aire comprimido hacia a las cámaras de frenado desde los tanques.	<ul style="list-style-type: none"> No enviar aire comprimido de manera rápida. 	<ul style="list-style-type: none"> Fuga de aire comprimido. 	<ul style="list-style-type: none"> Vida útil agotada. Presencia de aceite.
Compresor de aire	Tomar aire filtrado a presión atmosférica y comprimirlo hasta una presión máxima de 120 psi.	<ul style="list-style-type: none"> No enviar aire comprimido los tanques de manera normal. 	<ul style="list-style-type: none"> Presión manométrica de aire inferior a 120 psi. Descarga rápida de los tanques de aire comprimido. 	<ul style="list-style-type: none"> Compresor desgastado. Compresor flojo. Soporte del compresor dañado.
Correas del compresor	transmitir la potencia mecánica rotacional del cigüeñal al compresor	Perdida de transmisión de potencia mecánica.	<ul style="list-style-type: none"> Perdida inicial de fuerza de frenado. Vehículo bloqueado si funciona correctamente. Ruido de las correas. e el freno de parqueo. 	<ul style="list-style-type: none"> Agotamiento de vida útil. Correas flojas. Tuberías del compresor flojas.
Regulador de presión	Controlar la presión del compresor para que no sobre pase el valor de 120 psi.	<ul style="list-style-type: none"> Permitir una presión en los tanques de aire comprimido mayor a 120 psi. Impedir que la presión en 	<ul style="list-style-type: none"> Si ocurre sobre presión se genera una descarga ruidosa de aire comprimido por las válvulas de 	<ul style="list-style-type: none"> Daño de los interiores por presencia de aceite. Agotamiento de la vida útil.

		los tanques no llegue a 120 psi.	seguridad de los tanques.	
Botón freno parqueo	Liberar el vehículo y asegurar su inmovilidad a voluntad del conductor.	No liberar el freno de parqueo. No frenar el vehículo al activar el botón de parqueo.	Vehículo bloqueado. No bloquear el vehículo al activar el botón de parqueo.	<ul style="list-style-type: none"> • Agotamiento de la vida útil. • Presencia de aceite en el botón de parqueo
Tanques de aire comprimido.	Almacenar el aire comprimido.	No almacenar el aire proveniente del compresor.	<ul style="list-style-type: none"> • Fuerza de frenada disminuida (mayor distancia de frenado). • Fugas de aire. • 	<ul style="list-style-type: none"> • Válvulas de seguridad dañadas permitiendo fugas. • Tanque perforado por corrosión.
Líneas de aire comprimido.	Conducir el aire comprimido desde y hacia los puntos requeridos.	No llevar el aire comprimido a los puntos requerido de manera normal.	<ul style="list-style-type: none"> • fugas audibles de aire comprimido. • Descarga rápida de los tanques. • Pérdida de fuerza de frenado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Contacto con bordes cortantes. • Uniones flojas. • Contacto con partes calientes. • Líneas aplastadas. • Líneas conectadas incorrectamente.
SISTEMA DE SUSPENSIÓN	Soportar el, peso del vehículo y las cargas a través de las irregularidades de las vías.	No soportar el peso correspondiente.	Las ruedas contactan con partes de la carrocería. El automotor marcha torcido. Marcha irregular.	NA
Guías de muelles	Posicionar la carrocería y muelles correctamente.	Perdida de la posición lineal del automotor.	<ul style="list-style-type: none"> • Vehículo torcido. • Marcha irregular. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rotura de las guías por impactos del camino.

				<ul style="list-style-type: none"> • Rotura de la guía por estar mal apretada. • Grapas de los muelles flojos.
Platina principal	Soportar parte del peso del vehículo.	Perdida de soporte de parte del peso.	Perdida de estabilidad de la carga.	<ul style="list-style-type: none"> • Grapas flojas. • Corrosión. • Mala distribución de la carga. • Mala conducción del vehículo.
Platinas secundarias				
Bujes de muelles	Posicionar correctamente pasadores y muelles.	Perdida de posicionado.	Marcha con golpes.	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de lubricación.
Pasadores de muelle	Posicionar el muelle con su soporte.	Perdida de posicionado.	Marcha con golpes.	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de lubricación
Soportes de muelles	Posicionar correctamente el muelle.	Perdida de estabilidad y posicionado.	<p>Marcha con golpes.</p> <p>Rotura de platinas.</p> <p>Marcha inestable del automotor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de lubricación. • Tornillos de unión flojos. • Corrosión del soporte.
Hojas secundarias	Posicionar correctamente los muelles.	Perdida de posicionado.	<p>Marcha con golpes.</p> <p>Rotura de platinas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Grapas flojas. • Guía rota.
SISTEMA DE EMBRAGUE	Controlar el flujo de potencia mecánica del motor hacia la caja de velocidades.	Perdida de la transmisión de potencia mecánica.	Vehículo con imposibilidad de moverse a voluntad del conductor.	NA
Discos de embrague	Transmitir potencia mecánica desde el motor hacia la caja de velocidades.	Perdida de la transmisión de potencia mecánica.	Vehículo inmóvil.	<ul style="list-style-type: none"> • Agotamiento de vida por desgaste. • Rotura del disco. • Lubricante en los discos.
Rodamiento de desembrague	aplicar fuerza de desembrague	Imposibilidad de aplicar fuerza de desembrague.	Rodamiento ruidoso.	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de lubricación. • Agotamiento de

				vida del rodamiento. <ul style="list-style-type: none"> • Embrague mal ajustado.
Rodamiento de apoyo	Apoyar el eje de transmisión de potencia.	Pérdida del apoyo.	Ruidos inmanejables. Imposibilidad de desembragar.	<ul style="list-style-type: none"> • Agotamiento de vida útil. • Mal ajuste. • Falta de lubricación.
Prensa de embrague	Transmitir potencia mecánica desde el motor hacia la caja de velocidades.	Perdida de transmisión de potencia.	Imposibilidad de desembragar. Vibración al embragar.	<ul style="list-style-type: none"> • Agotamiento de la vida útil. • Mala calibración. • Superficies de acople distorsionadas.
Palancas de desembrague	Aplicar la fuerza del pie del conductor al rodamiento de desembragar.	Dificultad de operar el embrague.	Pedal con recorrido incorrecto.	<ul style="list-style-type: none"> • Rotura de pasadores. • Desgaste de uniones. • Perdida de sujetadores. • Mal armado del sistema.

Fuente: autor.

Identificadas las causas de fallas, asociadas a los efectos observados en los sistemas críticos, se procede a categorizar el grado de importancia de las mismas, para seleccionar aquellas por su relevancia en relación al impacto que generan en la disponibilidad y costos del parque de grúas, deben atenderse de manera prioritaria.

5.4 ASIGNACIÓN DE VALORES NPR

El valor del número prioritario de riesgos NPR, se obtiene como el producto de tres factores. Estos son: consecuencia de la falla, facilidad de detección de las causa de falla y probabilidad o frecuencia de ocurrencia de las fallas.

La tabla 16 presenta los valores NPR para las causas de fallas a atender. La columna de consecuencias define los aspectos del impacto del efecto de la falla sobre el servicio que se requiere de las grúas. Se utiliza una escala del 1 al 4, donde 1 es bajo y 4 alto impacto. La columna detección se define en la misma escala, donde bajo valor indica fácil detección y alto valor define detección más compleja. La columna probabilidad de ocurrencia posee la misma escala, donde un bajo valor indica poca frecuencia de ocurrencia y alto valor indica alta frecuencia de ocurrencia.

Tabla 16. Números NPR para las fallas analizadas

causas de falla	consecuencia	Detección	Probabilidad de ocurrencia	NPR
SISTEMA DE FRENOS.				
<ul style="list-style-type: none"> Desgaste normal. Agotamiento de la vida útil de las bandas. 	3	2	3	18
<ul style="list-style-type: none"> Desgaste anormal. Posicionado incorrecto de las bandas. 	1	2	1	2
<ul style="list-style-type: none"> Rotura de remaches de las bandas. 	1	2	1	2
<ul style="list-style-type: none"> Falta de lubricación, de los bujes. 	1	3	1	3
<ul style="list-style-type: none"> Incorrecto ajuste de los bujes. 	1	3	1	3
<ul style="list-style-type: none"> Tamaño incorrecto de rodajas (poco diámetro). 	3	3	2	18
<ul style="list-style-type: none"> Aceite en el diafragma de la 	3	2	2	12

cámara.	3	2	3	18
• Excesivo recorrido del diafragma.		2	2	12
• Perforado del diafragma por rotura del resorte	3			
• Corrosión del vástago.	2	2	2	8
• Agotamiento de vida útil del sello.	2	2	2	8
• Presencia de aceite en el sello.	2	2	2	8
• Corrosión del resorte de parqueo.	3	3	2	18
• Agotamiento del ciclo de vida del resorte.	3	3	2	18
• Ratchet con tornillo dañado.	3	2	2	12
• Agotamiento de la vida útil del Ratchet.	3	2	2	12
• Vida útil agotada. De la válvula.	2	2	1	4
• Presencia de aceite.	2	2	1	4
• Agotamiento de vida útil de las correas.	3	2	2	12
• Correas flojas.	3	2	2	12
• Tuberías del compresor flojas.	1	2	1	2
• Daño de los interiores por presencia de aceite.	3	2	1	6
• Agotamiento de la vida útil de la válvula.	3	2	1	6
• Agotamiento de la vida útil del botón.	3	3	2	18
• Presencia de aceite en el botón de parqueo.	1	2	3	6
• Válvulas de seguridad dañadas permitiendo fugas.	2	3	3	18
• Tanque perforado por corrosión.	2	3	3	18
• Contacto de las líneas de cobre y elastómeros con bordes cortantes.	2	2	1	4
• Uniones flojas.	2	2	1	4
• Contacto con partes calientes.	2	2	1	4
• Líneas aplastadas.	2	2	1	4
• Líneas conectadas incorrectamente.	3	2		6
SISTEMA DE SUSPENSIÓN.				

<ul style="list-style-type: none"> • Rotura de las guías por impactos del camino. 	3	2	3	18
	3	2	3	18
<ul style="list-style-type: none"> • Rotura de la guía por estar mal apretada. 	3	2	3	18
<ul style="list-style-type: none"> • Grapas de los muelles flojos. 				
<ul style="list-style-type: none"> • Grapas flojas. 	3	3	2	18
<ul style="list-style-type: none"> • Corrosión de las platinas. 	2	2	2	8
	2	3	2	12
<ul style="list-style-type: none"> • Mala distribución de la carga. 				
	3	3	2	18
<ul style="list-style-type: none"> • Mala conducción del vehículo. 				
<ul style="list-style-type: none"> • Falta de lubricación de bujes. 	2	1	2	4
<ul style="list-style-type: none"> • Falta de lubricación de pasadores. 	2	1	2	4
<ul style="list-style-type: none"> • Falta de lubricación de soportes de muelles. 	2	2	2	8
	2	2	2	8
<ul style="list-style-type: none"> • Tornillos de unión soportes- chasis flojos. 	2	2	2	8
<ul style="list-style-type: none"> • Corrosión del soporte. 				
<ul style="list-style-type: none"> • Grapas flojas. 	3	2	3	18
<ul style="list-style-type: none"> • Guía rota. 	3	2	3	18
SISTEMA DE EMBRAGUE.				
<ul style="list-style-type: none"> • Agotamiento de vida por desgaste de discos 	3	2	3	18
	3	2	3	18
<ul style="list-style-type: none"> • Rotura del disco. 	3	2	3	18
<ul style="list-style-type: none"> • Lubricante en los discos. 				
<ul style="list-style-type: none"> • Falta de lubricación del rodamiento de desembrague. 	3	2	3	18
<ul style="list-style-type: none"> • Agotamiento de vida del rodamiento. 	3	2	3	18
<ul style="list-style-type: none"> • Embrague mal ajustado. 	3	2	3	18
<ul style="list-style-type: none"> • Agotamiento de vida útil de rodamiento de apoyo. 	2	3	1	6
	2	3	1	6
<ul style="list-style-type: none"> • Mal ajuste de rodamiento. 	2	3	1	6
<ul style="list-style-type: none"> • Falta de lubricación. 				
<ul style="list-style-type: none"> • Agotamiento de la vida útil de la prensa 	2	3	2	12
	2	3	2	12
<ul style="list-style-type: none"> • Mala calibración de la prensa. 	2	3	2	12
<ul style="list-style-type: none"> • Superficies de acople de la prensa 				

distorsionadas.	2	3	2	12
• Volante de inercia distorsionado.				
• Rotura de pasadores.	2	2	2	8
• Desgaste de uniones.	2	2	2	8
• Perdida de sujetadores.	2	2	2	8
• Mal armado del sistema.	2	2	2	8

Fuente: autor.

A partir de los resultados de NPR, se define atender las causas con calificación igual o mayor que 8, para controlar los aspectos más relevantes a atender. Del total de 64 causas identificadas, resultan 43 cuyo puntaje indica que se deben atender mediante acciones preventivas de mantenimiento, para mejorar la disponibilidad actual.

5.5 PLAN DE MANTENIMIENTO RCM PROPUESTO

La tabla 17 define las acciones de mantenimiento a aplicar de manera preventiva, para atender el mapa de fallas correctivas.

La tabla 17 define las causas de fallas a atender con el plan de mantenimiento basado en el enfoque RCM. Es necesario identificar el tipo de acción de mantenimiento a aplicar, según cada causa analizada. Posteriormente, se deben definir las correspondientes acciones de mantenimiento preventivo que contempla el plan propuesto y su correspondiente frecuencia.

Tabla 17. Plan de mantenimiento con base RCM.

Causa de falla	Acción de mtto preventivo	Frecuencia	costo	Observación
Sistema de frenos				

<ul style="list-style-type: none"> Desgaste normal. Agotamiento de la vida útil de las bandas. 	Inspección visual cambio según modelo Weibull	Cada 15 días. Observar indicador de desgaste.		Minimizar costos y aumentar disponibilidad según modelo Weibull
<ul style="list-style-type: none"> Tamaño incorrecto de rodajas (poco diámetro). 	inspección visual según procedimiento del manual	cada vez que se cambien las bandas		Observar entre luz entre tambor y banda con Ratchet desgraduado, que no exceda de 5 milímetros. El borde del tambor debe estar libre de pestaña de desgaste y su espesor dentro de las tolerancias del manual.
<ul style="list-style-type: none"> Aceite en el diafragma de la cámara. 	Purgar los tanques de aire comprimido.	Si el compresor no consume aceite, una vez por semana. Si el compresor consume aceite, 4 veces por semana.		Si existe presencia de aceite en el agua de purga de los tanques, se debe reparar el compresor de aire del sistema de frenos.
<ul style="list-style-type: none"> Excesivo recorrido del diafragma. 	Inspección por medición.	Graduar los frenos cada 15 días o según informe del conductor sobre baja fuerza de frenado.		Des graduar completamente el Ratchet. Si la entre luz tambor – bandas excede de 2 centímetros,

				desmontar y reparar según apreciación
<ul style="list-style-type: none"> Perforado del diafragma por rotura del resorte. 	Purgar tanques de aire comprimido.	Semanalmente según indicación anterior.		Evitar agua en las cámaras de frenado que ocurre por no purgar los tanques.
<ul style="list-style-type: none"> Corrosión del vástago. 	ídem	Ídem		Ídem
<ul style="list-style-type: none"> Agotamiento de vida útil del sello. 	Cambio periódico.	Cambiar cada año de uso.		Cambiar interiores de las cámaras de freno anualmente.
<ul style="list-style-type: none"> Presencia de aceite en el sello. 	Purgar los tanques de aire comprimido.	Si el compresor no consume aceite, una vez por semana. Si el compresor consume aceite, 4 veces por semana.		Si existe presencia de aceite en el agua de purga de los tanques, se debe reparar el compresor de aire del sistema de frenos.
<ul style="list-style-type: none"> Corrosión del resorte de parqueo. 	Purgar tanques de aire comprimido.	Semanalmente según indicación anterior.		Evitar agua en las cámaras de frenado que ocurre por no purgar los tanques.
<ul style="list-style-type: none"> Agotamiento del ciclo de vida del resorte de parqueo. 	Cambio periódico.	Cambiar cada dos años de uso.		Al reparar la cámara la primera vez, raspar presencia de corrosión y pintar resortes antes de armado.

<ul style="list-style-type: none"> Rachet con tornillo dañado. 	Inspeccionar estado del graduador.	Semanalmente, cada vez que los frenos se gradúan.		Si un Rachet se encuentra desgastado durante la graduación, cambiarlo por uno nuevo de marca reconocida.
<ul style="list-style-type: none"> Agotamiento de la vida útil del Rachet. 	Cambio periódico.	Cambiar cada año.		La vida útil de un Rachet es de un año normalmente.
<ul style="list-style-type: none"> Agotamiento de vida útil de las correas. 	Inspección visual.	Cada semana.		Observar por presencia de grietas en la correa. Cambiar anualmente las correas del compresor de aire.
<ul style="list-style-type: none"> Correas flojas. 	Ajuste periódico.	Revisar tensión cada mes.		Ajustar pero cuidando de no tensionar excesivamente porque se acorta la vida útil de la correa y de los rodamientos relacionados. No dejar la correa distensionada porque ocurren chirridos molestos y el compresor carga lentamente.

<ul style="list-style-type: none"> • Agotamiento de la vida útil del botón de parqueo. 	Cambio periódico.	Cambiar cada dos años.		Verificar repuesto original
<ul style="list-style-type: none"> • Válvulas de seguridad dañadas permitiendo fugas. 	cambio periódico	Cambiar cada año.		Cambiar por repuesto original, aunque funcionen correctamente.
<ul style="list-style-type: none"> • Tanque perforado por corrosión. 	Purga periódica del tanque.	Cambiar o reparar tanque con el problema.		No eliminar el tanque porque se disminuye la reserva de aire comprimido.
Sistema de suspensión				
<ul style="list-style-type: none"> • Rotura de las guías por impactos del camino. 	Apretar grapas periódicamente.			
<ul style="list-style-type: none"> • Rotura de la guía por estar mal apretada. 	Apretar guía durante reparación del muelle.			
<ul style="list-style-type: none"> • Grapas de los muelles flojos. 	Apretar grapas periódicamente			
<ul style="list-style-type: none"> • Corrosión de las platinas. 	Lavar chasis de la grúa.	Cada 15 días.		Petrolizar mensualmente los muelles.
<ul style="list-style-type: none"> • Mala distribución de la carga 	Inspección visual de vehículo nivelado con la carga.	Cada vez que se utilice el vehículo.		Responsabilidad del conductor.
<ul style="list-style-type: none"> • Mala conducción del vehículo. 	Revisar comportamiento del conductor	Al momento de contratarlo y cada mes.		Utilizar GPS para controlar ubicación.
<ul style="list-style-type: none"> • Agotamiento de vida útil de los muelles 	Cambio según modelo Weibull			Minimizar costos y aumentar disponibilidad según modelo Weibull

Sistema de embrague				
<ul style="list-style-type: none"> • Agotamiento de vida útil por desgaste de discos. • Rotura del disco. • Lubricante en los discos. 	<p>Cambio periódico según modelo Weibull.</p> <p>Revisión de marcador de desgaste</p>	<p>Revisión mensual cada vez que el vehículo está en lavado general.</p>		<p>Minimizar costos y aumentar disponibilidad según modelo Weibull</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Falta de lubricación del rodamiento de desembrague. • Agotamiento de vida del rodamiento. • Embrague mal ajustado. 	<p>Aplicar una embolada con grasa NLG 2.</p> <p>Ajustar el recorrido libre del embrague según manual de servicio</p>	<p>Cada mes cuando se lave la grúa.</p> <p>Ajustar cloche cada mes.</p>		
<ul style="list-style-type: none"> • Agotamiento de la vida útil de la prensa • Mala calibración de la prensa. • Superficies de acople de la prensa distorsionadas. • Volante de inercia distorsionado. 	<p>Revisar y cambiar lo pertinente.</p>	<p>Cada vez que se repara el embrague por cambio de discos</p>		<p>Si los discos se cambian oportunamente se puede reutilizar la prensa al menos una vez.</p> <p>Para la correcta calibración de la prensa se debe aplicar el correspondiente procedimiento, según el manual de servicio del vehículo.</p>

Fuente: autores.

5.6 MODELO DE COSTOS PARA ASIGNAR FRECUENCIA ÓPTIMA DEL PLAN.

Anteriormente se ha seguido un proceso cualitativo complementado con algunas cantidades genéricas para definir las acciones de mantenimiento a aplicar que se esperan sean eficaces para el objetivo de aumentar la disponibilidad y reducir los costos anuales relacionados con el departamento de mantenimiento.

9

- **Definición de frecuencias óptimas.**

Para definir la frecuencia de actuación preventiva se define el siguiente modelo matemático para su óptima determinación. La ecuación 7 expresa que el costo total de mantenimiento C (mt) es la suma del correspondiente al preventivo C(mp) más el correctivo C(mc).

La ecuación 8 expresa el costo total de mantenimiento como función del tiempo de mantenimiento preventivo t. Se observa que el costo total de mantenimiento depende del valor del tiempo preventivo, que sea mayor al parámetro de inicio. También, que se puede construir el valor de costo dando valores al tiempo de mantenimiento preventivo t.

Ecuación 7

$$C (mt) = C (mp) + C (mc)$$

$$C (mt) / \text{año} = C_u (mp) * N_{mp} / \text{año} + C_u (mc) * N_{mc} / \text{año}.$$

Ecuación 8

$$C (mt) = C_u (mp) * \frac{Nha}{t} + C_u (mc) * \frac{Nha}{t} * \left[1 - e^{-\left(\frac{t-\delta}{\theta}\right)^6} \right]$$

Dónde.

C (mt) = costo de mantenimiento total.

¹³ Manual de operación y mantenimiento preventivo marca International. Año 2005.

$C (mp)$ = costo de mantenimiento preventivo.

$C (mc)$ = costo de mantenimiento correctivo.

$Cu (mp)$ = costo unitario promedio para el mantenimiento preventivo.

$Cu (mc)$ = costo unitario promedio para el mantenimiento correctivo.

$Nmp/año$ = número de mantenimientos preventivos por año. Se estima como el número de horas de trabajo al año, dividida entre el intervalo de tiempo en que el mantenimiento preventivo se ejecuta.

La variable aleatoria es el tiempo t . De manera específica, t es el tiempo que se define para realizar las reparaciones programadas de los sistemas críticos, que ahora se manejan en modalidad preventiva, con un grado de probabilidad de falla admitido. El modelo plantea que el costo total de mantenimiento es la suma del costo para mantenimiento preventivo más el costo para el mantenimiento correctivo. La función de probabilidad acumulada de falla $f(t)$ afecta la probabilidad de ocurrencia del costo por mantenimiento correctivo. El intervalo de tiempo para realizar el mantenimiento preventivo es el valor en horas de la variable aleatoria t . El modelo se aplica individualmente por cada sistema crítico analizado.

Los vehículos operan 330 días al año, trabajando 16 horas por día. Por lo tanto, el número de horas calendario disponibles para que operen cada grúa anualmente, en promedio es de 5280 horas / año. Cada grúa recorre diariamente un promedio de 200 kilómetros. Por lo cual, anualmente se estima un recorrido de 66.000 kilómetros / año.

- **Optimización de costos para el sistema de frenos.**

El costo unitario promedio de reparación para el sistema de frenos por grúa, se define en \$ 850.000. El tiempo de mantenimiento preventivo para cambio programado de bandas t_f , se define en kilómetros.

El costo promedio por lucro cesante al ocurrir un daño de freno en vía pública es de \$ 2.000.000, incluyendo la grúa de desvare. No se incluyen posibles multas de Tránsito.

La ecuación 9 plantea el modelo de cálculo de costos para el sistema de frenos.
Ecuación 9

$$C (mt) = 850.000 * \frac{66.000}{t} + 2.000.000 * \frac{66.000}{t} * \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{18500}\right)^{1.5}} \right]$$

$$C (mt) = \frac{5.61 * 10^{10}}{t} + 2.000.000 * \frac{66.000}{t} * \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{18500}\right)^{1.5}} \right]$$

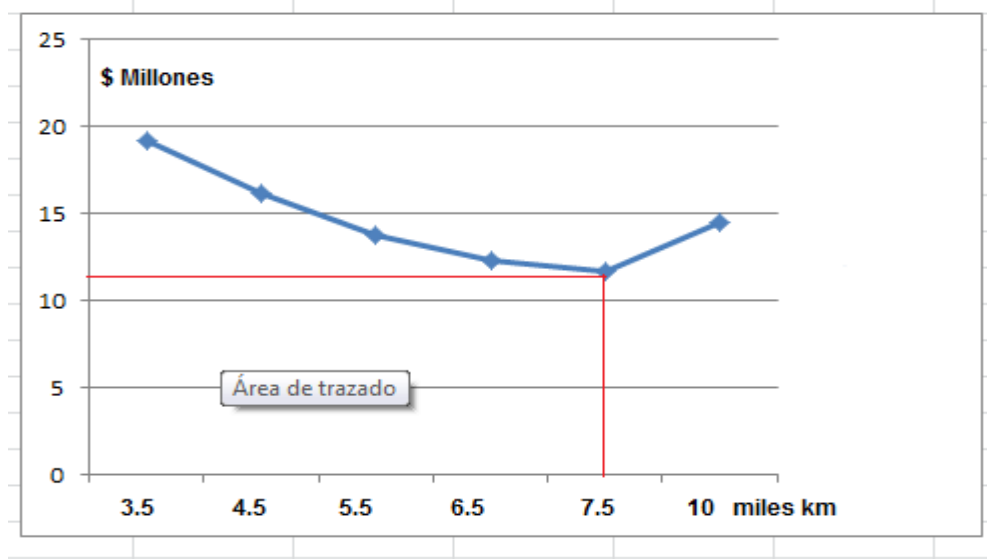
Asignando valores a t dentro del intervalo entre 3500 y 10.000 kilómetros en intervalos de 1000 km, se tienen los valores de costos de la tabla 18. Se observa que en el intervalo de 7500 kilómetros, se tiene el menor costo para la intervención del sistema de frenos, con un número esperado de fallas correctivas al año de 2, valor que puede ser aceptado, especialmente teniendo en cuenta que el número de fallas actuales al año para el sistema de frenos, es de 17. La figura 15 presenta la vista de este comportamiento, confirmando que el valor de costo mínimo se obtiene con intervenciones periódicas a los frenos cada 7500 kilómetros.

Tabla 18. Costo total para sistema de frenos en función de intervalo t de recambio.

kilómetros de recambio t	N° de paradas programadas.	fallas esperadas $66000/t \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{18500}\right)^{1.5}} \right]$	Costo total unitario
3500	19	1.5	19,150,000
4500	15	1.69	16,130,000
5500	12	1.795	13,790,000
6500	10	1.88	12,260,000
7500	9	2	11,650,000
10.000	7	4.3	14,550,000

Fuente: autor.

Figura 15. Perfil de costo total para sistema de frenos.



Fuente: autor.

Los resultados del modelo, indican que para el sistema de frenos, el tiempo entre mantenimiento preventivos para controlar el deterioro debe ser de 7500 kilómetros, para minimizar los costos, asumiendo una probabilidad de 22 % para que ocurra como máximo 2 fallas al año, por grúa para este sistema. Donde, los estimados corresponden al actual perfil de confiabilidad del parque automotor.

Por supuesto, que se debe tener en cuenta el efecto del plan de mantenimiento propuesto en el proyecto, que debe mejorar el perfil de fallas, disminuyendo la cantidad o probabilidad de ocurrencia de ellas. Por lo que en realidad se espera un menor número de fallas en ese periodo, con la misma probabilidad de ocurrencia esperada. Esto comportamiento, puede decirse que es similar también, para los sistemas de suspensión y embrague.

- **Optimización de costos para el sistema de suspensión.**

El costo unitario promedio de reparación para el sistema de suspensión, se define en \$ 780.000.

Ecuación 10

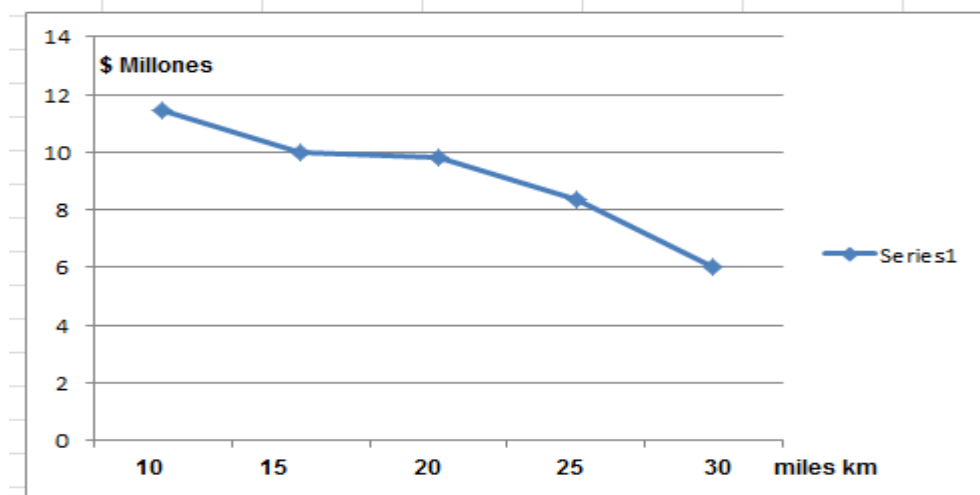
$$C (mt) = 780.000 \cdot \frac{66.000}{t} + 3.000.000 \cdot \frac{66.000}{t} * \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{23500}\right)^{1.26}} \right]$$

Tabla 19. Costo total de sistema de suspensión en función de intervalo t de recambio.

kilómetros de recambio t	N° de paradas programadas.	fallas esperadas	Costo total unitario
10.000	7	2	11.460.000
15.000	5	2.16	10.380.000
20.000	4	2.23	9.810.000
25.000	3	2	8.340.000
30.000	2	1.48	6.000.000

Fuente: autor.

Figura 16. Perfil de costo total para sistema de suspensión.



Fuente: autor.

En este caso, el intervalo de intervención recomendado para el mantenimiento preventivo de reacondicionamiento del sistema de suspensión, se define en

30.000 kilómetros. Teniendo en cuenta que coincide con la cuarta intervención al sistema de frenos ($40.000 / 7500 = 4$) y coincidentalmente se tiene los costos mínimos. La probabilidad de ocurrencia de un daño de tipo correctivo en este caso, es de 40 %. Aunque se percibe como alta, se debe recordar que este tipo de daños, con el plan propuesto, tendrá una drástica reducción, especialmente porque las fallas ocurren por aflojamiento de las grapas roscadas, que unen los trenes a los muelles de ballestas debido al terreno en que se trabaja, para lo cual se ha definido una acción de mantenimiento preventivo periódica, de reapriete de las grapas cada 20 días, por parte de los auxiliares de mecánica disponibles. Con esto, se evita la rotura repentina y se mantiene el costo mínimo esperado para este tipo de falla, inevitable por el deterioro natural que ocurre con el uso de los equipos.

- **Optimización de costos para el sistema de embrague.**

El costo unitario promedio de reparación para el sistema de embrague, se define en \$ 1.200.000.

Ecuación 11

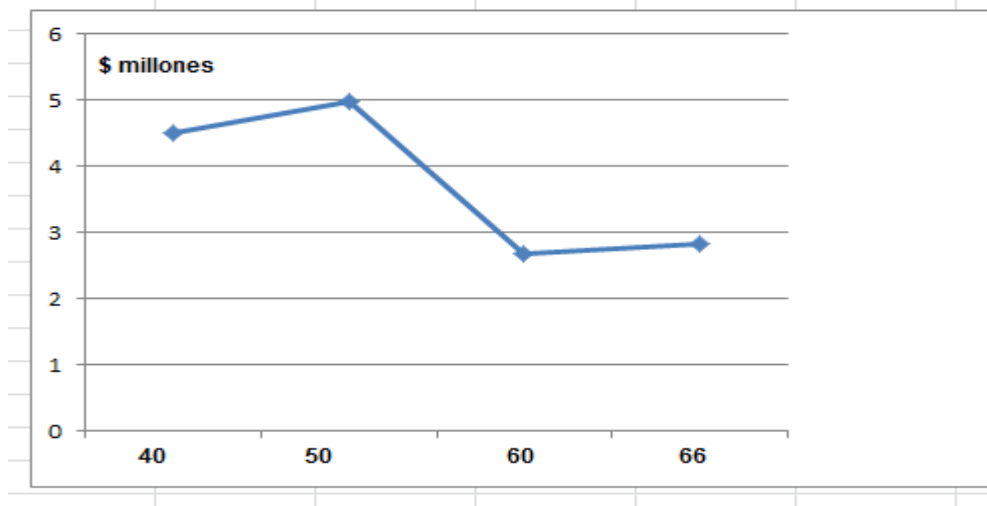
$$C (mt) = 1.200.000 * \frac{66.000}{t} + 3.000.000 * \frac{66.000}{t} * \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{83500}\right)^{1.12}} \right]$$

Tabla 20. Costo total de sistema de embrague en función de intervalo t de recambio.

kilómetros de recambio t	Nº de paradas programadas.	fallas esperadas	Costo total unitario
40.000	2	0.70	4.500.000
50.000	2	0.86	4.980.000
60.000	1	0.49	2.670.000
66.000	1	0.54	2.820.000

Fuente: autor.

Figura 17. Perfil de costo total para sistema de embrague.



Fuente: autor.

Para el sistema de embrague, se define el mantenimiento de reacondicionamiento a los 60.000 kilómetros, donde ocurre el costo mínimo según el perfil de fallas esperado. Además, coincide con la intervención 8 para los frenos y la segunda para la suspensión. Por ello, los costos resultantes son menores a los estimados con el modelo, dado que el costo por mantenimiento correctivo corresponde a una intervención y no las tres individuales según se aplica con el modelo.

Por supuesto, la probabilidad de falla asumida del 49 %, será menor con el plan de mantenimiento preventivo propuesto. Incluso, el costo de la intervención preventiva será menor, dado que se espera cambiar solo los discos de embrague, los rodamientos y piezas menores, sin tener que cambiar la prensa, cuyo costo representa el 60 % de la intervención para el embrague, lo cual es la situación normal actual.

El costo anual minimizado para el parque de grúas, aplicando el modelo propuesto, se estima en un valor de 20.320.000 por grúa o 203 millones para el parque automotor. Comparado con el valor actual real anual para el año 2016 de

valor 350 millones, se espera un ahorro de costos de 147 millones, lo cual representa un 35 % de ahorro anual con el plan propuesto, sin incluir el efecto en la mejora de la disponibilidad, que es un resultado que debe generarse con la aplicación del proyecto.

El número de horas que se pronostica se presente con el ajuste de las frecuencias de mantenimiento preventivo mediante acciones periódicas de reacondicionamiento, es de 30 al año, lo cual comparado con las actuales 50 anual, representa una reducción del 40 %. Con esto, se mejora la prestación del servicio prestado por el parque de grúas, mejorando la rentabilidad actual de la empresa propietaria y liberándola de las penalizaciones, que ocurren por el no cumplimiento del número de servicios meta acordada.

5.7 DOCUMENTACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO RCM PROPUESTO

La tabla 21 muestra el formato de orden de trabajo a utilizar junto con el plan de mantenimiento propuesto a utilizar para asignar las actividades de mantenimiento a realizar.

Tabla 21. Formato de orden de trabajo.

Fecha _____	Asignador _____	Operario ejecutor _____
Requerimiento de la falla del sistema _____		
Ruido _____	olor _____	vibracion _____
valor de medicion _____	informe del operario _____	
Hora de inicio _____		
Hora de finalizacion _____		
Duracion total de la actividad _____		
Elementos de seguridad para la actividad _____		
procedimiento estandarizado N° _____		
Marcar con una X si no existe _____		
1. Diagnostico de la falla _____		
2. Repuestos a cambiar _____		
3.1. Insumos de limpieza _____		
3.2. insumos de lubricacion _____		
4. tiempo de desarme _____		
tiempo de armado _____		
tiempo para repuestos _____		
tiempo estandar de la actividad _____		
5. Numeros de facturas de compra _____		
6. Costo total de la reparacion _____		
7. Observaciones sobre retrasos _____		

Fuente: autor.

Por indicador se entiende un concepto visualizado mediante una ecuación que permite medir algún desempeño requerido o deseable.

La tabla 22 muestra el formato para estimar el valor de disponibilidad operacional mensual tomado como medidor de desempeño del sistema en el contexto del mantenimiento que se aplica.

Para los fines del proyecto interesa lo siguiente:

- Tiempo medio entre fallas. Mide el control de las fallas imprevistas.
- Tiempo medio para hacer mantenimiento. Mide la eficiencia de los operarios de mantenimiento.

Tabla 22. Formato de cálculo de disponibilidad.

<p>Fecha _____ Mes evaluado _____ Calculista _____</p> <p>1. Calculo de la disponibilidad (D).</p> <p>Horas habiles del mes (Hhm) _____</p> <p>Horas habiles con el equipo en mantenimiento (Hm) _____</p> <p>$D = (Hhm - Hm) / Hhm) \times 100$</p> <p>2. Calculo del tiempo promedio de mantenimiento MTR</p> <p>Tr 1 = ____ hrs. Tr2 = ____ hrs. Tr3 = ____ hrs. Trn = ____ hrs.</p> <p>$MTR = \sum Tr i / n$</p> <p>Observaciones</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>

6. CONCLUSIÓN

Se define un plan de mantenimiento preventivo ajustado a un parque de 10 grúas, utilizadas para prestar servicios de reparaciones a redes eléctricas públicas de baja y media tensión. Con su aplicación, se estima una reducción del costo anual de 35%, desde el valor actual de 350 millones hasta uno esperado de 203 millones, cifra calculada, mediante un modelo de costo de optimización de las frecuencias de mantenimiento preventivo de tipo reacondicionamiento cíclico de los sistemas críticos deteriorados de frenos, suspensión y embrague.

El plan se desarrolla siguiendo la orientación de la metodología RCM y AMEF, priorizando los recursos a aplicar mediante la asignación de una escala basada en el número prioritario de riesgo para cada actividad de mantenimiento definida con el desarrollo del plan.

El valor anual esperado para el parque de grúas, una vez en funcionamiento el plan, se espera se aproxime a la cifra de 150 millones de pesos, que es el estándar según el plan de mantenimiento preventivo, definido por el manual de servicio del fabricante, que sirve como la base para estimar el presupuesto anual a asignar al parque de vehículos. Con esto, se estima que las fallas pasaran de 50 anual y el mismo número de ordenes no cumplidas y penalizadas a 30 fallas por año, que representa una cifra anual del 40%, lo cual mejora ostensiblemente la imagen de esta empresa, que opera como proveedora de servicios tipo outsourcing y la posiciona para renovar el contrato, que ocurre cada dos años, si las partes acuerdan mutua satisfacción.

Se define una documentación básica para que se pueda capturar los datos y estimar la evolución cuantitativa mensual de los indicadores de disponibilidad y costos, que son el referente que la empresa define como sus indicadores claves de desempeño.

BIBLIOGRAFÍA.

ARZUAGA Churio José Elías. Año 2014. “Modelo de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) en la flota de equipos de oruga D11N de la empresa minera Drummond Ltda”. Trabajo de grado especialista. Universidad Industrial de Santander.

BIVONA E. Año 2005. “Evaluating Fleet and Maintenance Management Strategies through System Dynamics Model in a *City Bus Company*”.

CRESPO E. Año 2008. Optimización Estocástica del Mantenimiento de Sistemas de Transporte y Secado de Sustancias Minerales. Universidad Politécnica de Madrid. Tesis doctoral.

DIETSCHKE, Karl-Heinz (ed.) (2005) *Manual de la técnica del automóvil*. Berlín: Robert Bosch GmbH.

DOMÍNGUEZ, Esteban José y Ferrer, Julián (2012) *Los frenos en los vehículos (Sistemas de transmisión y frenado)*. Madrid: EDITEX.

DUFFUAA S, Raouf A and Dixon J Año 2010 “Sistemas de mantenimiento: Planeación y Control”. Editorial Limusa.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Año 2010. Normas colombianas para la presentación de trabajos escritos NTC-1486. Santa Fe de Bogotá D.C. ICONTEC.

Manual de operación y mantenimiento preventivo marca International. Año 2005.
Manual de servicios International. Año 2005.

MOUBRAY J. mantenimiento centrado en la confiabilidad. Editorial Aladon. Año 2010.

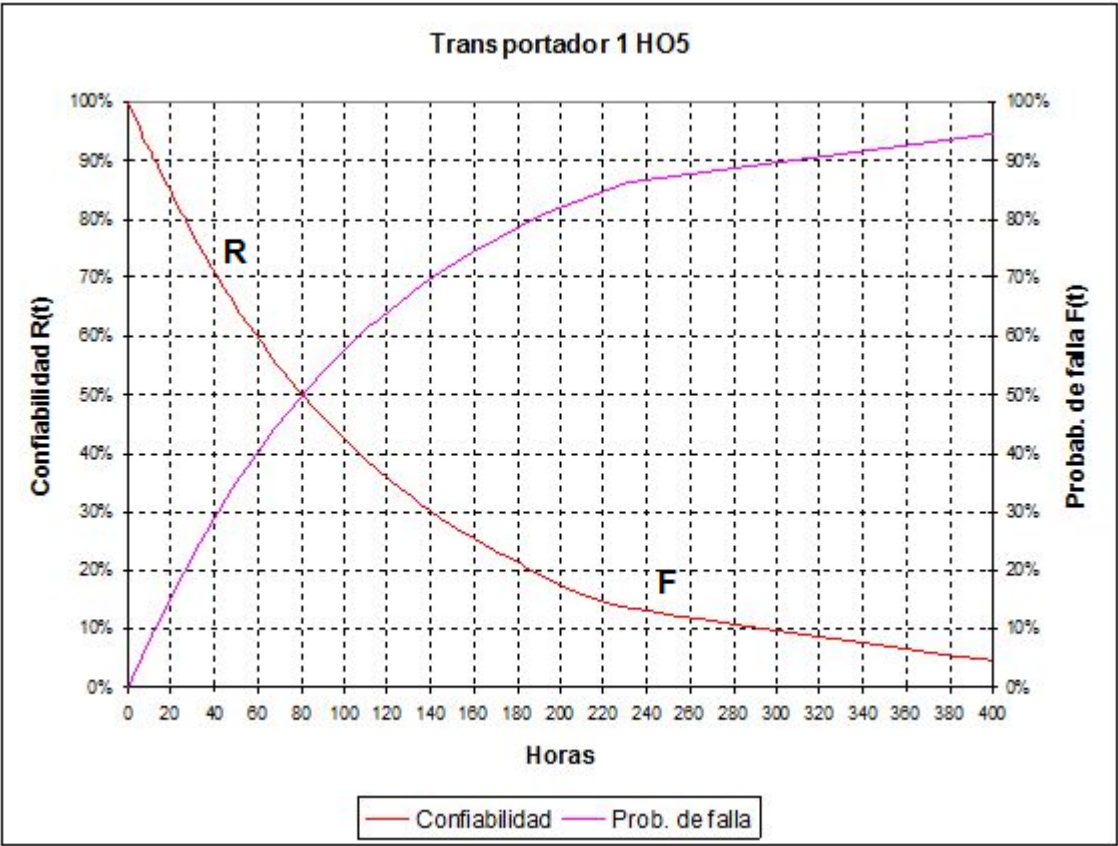
NAKAGAWA T and Kowada M. 1983 “Analysis of a system with minimal repair and its applications to replacement policy“. Eur J oper res 12: 176 – 193.

ORTIZ Daniel. Año 2011. El método, diagrama de flujo RCM. Especialización en gerencia de mantenimiento. Bogotá. UIS.

WABCO (ed.) (2010) *Componentes de frenos neumáticos para vehículos remolcados a la normativa 71/320/CEE Catálogo esquemático para remolques descripción de sistemas de frenado y componentes de frenos neumáticos.* Recuperado de: <http://inform.wabco-auto.com/intl/pdf/815/00/34/8150400343.pdf>

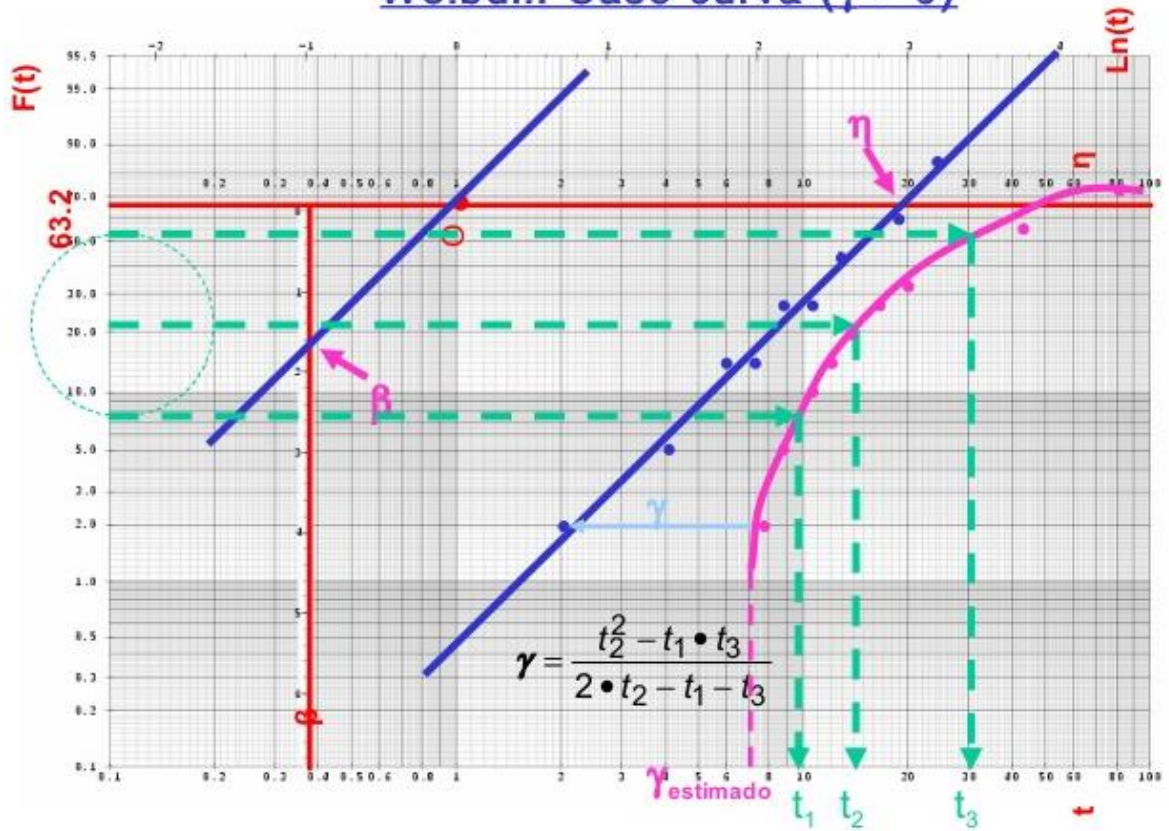
ANEXOS

Anexo A. FUNCIÓN DE CONFIABILIDAD Y DE PROBABILIDAD DE FALLA ACUMULADAS.



Anexo B. ESTIMACIÓN CUASI GRÁFICA DE PARÁMETROS PARA EL MODELO DE WEIBULL A PARTIR DE DATOS.

Weibull. Caso curva ($\gamma > 0$)



|

Anexo C. POSIBLE INTERPRETACIÓN DE VALORES DE LOS PARÁMETROS.

En el estudio de la distribución se pueden dar las siguientes combinaciones de los parámetros de Weibull con mecanismos de fallo particulares:

$t_0 = 0$: el mecanismo no tiene una duración de fiabilidad intrínseca, y:

si $\beta < 1$ la tasa de fallos disminuye con la edad sin llegar a cero, por lo que podemos suponer que nos encontramos en la juventud del componente con un margen de seguridad bajo, dando lugar a fallos por tensión de rotura.

si $\beta = 1$ la tasa de fallo se mantiene constante siempre lo que nos indica una característica de fallos aleatoria o pseudo-aleatoria. En este caso nos encontramos que la distribución de Weibull es igual a la exponencial.

si $\beta > 1$ la tasa de fallo se incrementa con la edad de forma continua lo que indica que los desgastes empiezan en el momento en que el mecanismo se pone en servicio.

si $\beta = 3,44$ se cumple que la media es igual a la mediana y la distribución de Weibull es sensiblemente igual a la normal.

$t_0 > 0$: El mecanismo es intrínsecamente fiable desde el momento en que fue puesto en servicio hasta que $t = t_0$, y además:

si $\beta < 1$ hay fatiga u otro tipo de desgaste en el que la tasa de fallo disminuye con el tiempo después de un súbito incremento hasta t_0 ; valores de β bajos ($\sim 0,5$) pueden asociarse con ciclos de fatigas bajos y los valores de b más elevados ($\sim 0,8$) con ciclos más altos.

si $\beta > 1$ hay una erosión o desgaste similar en la que la constante de duración de carga disminuye continuamente con el incremento de la carga.

$t_0 < 0$. Indica que el mecanismo fue utilizado o tuvo fallos antes de iniciar la toma de datos, de otro modo

si $\beta < 1$ podría tratarse de un fallo de juventud antes de su puesta en servicio, como resultado de un margen de seguridad bajo.

si $\beta > 1$ se trata de un desgaste por una disminución constante de la resistencia iniciado antes de su puesta en servicio, por ejemplo debido a una vida propia limitada que ha finalizado o era inadecuada¹⁰.