

Modelo de gestión de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) para el sistema de frenos de camiones de acarreo CAT 777C-D de la empresa Drummond Ltd

Luis Horacio Rueda Carreño, Octavio Mauricio Torres Fuentes

Monografía presentada como requisito para Optar por el título de Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Director

Cristian Vega De Lavalle

Especialista en Mantenimiento Industrial

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Bucaramanga

2018

### **Dedicatoria**

Dedicamos este trabajo a Dios, por bendecirnos en todo momento, a nuestras familiares por permitir que sacrificáramos su tiempo y a nuestros amigos y compañeros de trabajo que nos aconsejaron y guiaron en los momentos de dificultades.

### **Agradecimientos**

Damos nuestros agradecimientos primeramente a Dios, por permitirnos emprender estos estudios de especialización y lograr todos los objetivos propuestos.

A nuestras familias, que nos apoyaron de manera irrevocable y nos brindaron sus mejores palabras de ánimo y acciones de servicio para poder superar todos nuestros obstáculos.

Al grupo de trabajo de la flota de camiones carboneros y auxiliares de la empresa Drummond Ltd, quienes nos brindaron sus conocimientos y permitieron que fuera posible estructurar este proyecto.

**Tabla de contenido**

Introducción.....	18
1. Drummond ltd.....	19
1.1. Procesos de Producción.....	20
1.1.1 Planeación e Ingeniería de Producción. ....	21
1.1.2 Perforación y Voladura. ....	22
1.1.3 Carga y Transporte de material estéril. ....	24
1.1.4 Carga y transporte de carbón.....	25
1.1.5 Cargue de trenes y transporte hacia puerto .....	28
1.2. Mantenimiento Equipo Móvil .....	29
1.2.1 Mantenimiento camiones 240 toneladas .....	30
1.2.2 Mantenimiento camiones carboneros y auxiliares .....	30
1.2.3 Mantenimiento cargadores .....	31
1.2.4 Mantenimiento tractores.....	33
1.2.5 Mantenimiento equipo liviano.....	33
2. Planteamiento del problema.....	34
3. Objetivos .....	36
3.1. Objetivo general .....	36
3.2. Objetivos Específicos .....	36
4. Justificación del plan propuesto .....	37
5. Análisis literatura recopilada .....	38
5.1. Marco Teórico .....	38

5.1.1	Definición de RCM. ....	39
5.1.2	Historia y evolución del RCM.....	40
5.1.3	Metodología de RCM. ....	44
5.2.	Marco Conceptual .....	48
5.2.1	Fiabilidad.....	48
5.2.2	Disponibilidad .....	48
5.2.3	Mantenibilidad.....	48
5.2.4	Fallas de causa común .....	48
5.2.5	Fallas de modo común.....	48
5.2.6	Mantenimiento.....	49
6.	Desarrollo metodológico del rcm .....	50
6.1.	Organización .....	50
6.2.	Delimitación del sistema de estudio .....	50
6.3.	Descripción del sistema de frenos .....	58
6.3.1	Compresor de aire de servicio .....	58
6.3.2	Secador de aire .....	60
6.3.3	Tanque de almacenamiento de aire principal y válvula cheque .....	60
6.3.4	Válvula de protección.....	61
6.3.5	Válvula de freno de servicio.....	62
6.3.6	Válvula de freno de retardo manual. ....	62
6.3.7	Válvula de retardo automático. ....	63
6.3.8	Válvula relay de frenos.....	63
6.3.9	Roto-cámara de frenos.....	64

6.3.10 Ajustador de frenos .....	65
6.3.11 Tanque de aire secundario .....	66
6.3.12 Válvula de frenos secundarios.....	66
6.3.13 Válvula inversora de frenos.....	67
6.3.14 Válvula de liberación de freno de parqueo.....	67
6.3.15 Mandos finales .....	68
6.4. Características técnicas y contexto operacional del sistema de frenos .....	68
6.5. Funciones del sistema y desarrollo del AMFE.....	72
6.6. Selección de tareas de mantenimiento.....	75
6.7. Análisis de modelo de mantenimiento propuesto.....	77
6.7.1 Plan de mantenimiento actual.....	78
6.7.2 Actividades de búsqueda de falla. ....	79
6.7.3 Actividades de reacondicionamiento cíclico.....	82
6.7.4 Actividades de sustitución cíclica .....	82
6.8. Verificación de cumplimientos de objetivos .....	87
7. Conclusiones.....	92
8. Recomendaciones .....	94
Referencias bibliográficas .....	95
Apéndice .....	97

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Tipos y cantidad de equipos de la flota más representativas en la empresa Drummond Ltd. ....	26
Tabla 2. Evolución del mantenimiento. ....	42
Tabla 3. Características técnicas de los camiones 777D.....	52
Tabla 4. Características técnicas y contexto operacional de las partes del subsistema de carga de aire.....	69
Tabla 5. Características técnicas y contexto operacional de las partes del subsistema de frenos principales. ....	70
Tabla 6. Características técnicas y contexto operacional de las partes del subsistema de frenos secundarios y de liberación de parqueo. ....	71
Tabla 7. Síntesis cuantitativa de los elementos más críticos del sistema de frenos principales usando el análisis de criticidad a través del cálculo del número de prioridad de riesgo NPR.....	88

### Lista de Figuras

Figura 1. Localización geográfica de las minas Pribbenow y El Descanso. Tomado de <a href="https://www.google.com/maps">https://www.google.com/maps</a> . .....	21
Figura 2. Taladro DRILTECH D 75K realizando perforaciones en mina El Descanso. Drummond Ltd. ....	22
Figura 3. Dragalina Elza, alimentación de Apron Feeder con aluvión. Mina El Descanso. Drummond Ltd.....	23
Figura 4. Cargue de camión con pala hidráulica en zona de voladura. Mina El Descanso. Drummond Ltd. Tomado de <a href="https://www.drummondLtd.com/nuestras-operaciones/mina">https://www.drummondLtd.com/nuestras-operaciones/mina</a> .....	25
Figura 5. Extracción de aluvión proceso Dragalina – Apron feeder – Camiones Komatsu. Mina El Descanso. Drummond Ltd.....	26
Figura 6. Cargue de carbón, pala hidráulica PC1000 con camión de acarreo 777D. Mina Pribbenow. Drummond Ltd. Tomado de <a href="https://www.drummondLtd.com/nuestras-operaciones/mina">https://www.drummondLtd.com/nuestras-operaciones/mina</a> .....	28
Figura 7. Load out mina Pribbenow. Tomado de <a href="https://www.drummondLtd.com/nuestras-operaciones/mina">https://www.drummondLtd.com/nuestras-operaciones/mina</a> .....	29
Figura 8. Camiones CAT 793D siendo cargados por una pala BUCYRUS 495HR en mina Pribbenow. Drummond Ltd. ....	30
Figura 9. Equipo carbonero CAT 777D. Mina El Descanso. Drummond Ltd. ....	31
Figura 10. Equipo CAT 777D usado como tanquero. Mina Pribbenow. Adaptado de Marin, Adolfo (2017), Modelo de Gestion de mantenimiento centrado en confiabilidad para el sistema de riego de camiones tanqueros de la empresa Drummond Ltd. ....	32

Figura 11. Motoniveladora CAT 24M en arreglo de vías, mina El Descanso. Drummond Ltd. ...	32
Figura 12. Tractor D11R en taller de mantenimiento. Mina El Descanso. Drummond Ltd. ....	33
Figura 13. Modos de Falla de acuerdo a la generación del mantenimiento (1997). Jhon Moubray. RCM II .....	42
Figura 14. Diagrama de flujo para una metodología RCM (2002). Deshpande y Modak. Application of RCM to a médium scale industry. Reliability enginnering and system safety	77.45
Figura 15. Relación entre fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad. Obtenido de <a href="http://www.mantenimientomundial.com/sites/libro/Torres/Parte1.pdf">http://www.mantenimientomundial.com/sites/libro/Torres/Parte1.pdf</a> .....	48
Figura 16. Equipo de trabajo para el desarrollo del RCM. ....	51
Figura 17. Sistemas principales que componen un camión 777C-D. ....	53
Figura 18. Taxonomía del subsistema de carga de aire. Sistema de frenos de camiones CAT 777C y 777D, series 4XJ, AGC, 3PR y 5ER. ....	54
Figura 19. Esquema de carga de aire para el sistema de frenos de camiones CAT 777C – 777D series 4XJ, AGC, 5ER y 3PR. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR. ....	54
Figura 20. Taxonomía de subsistema de frenos de servicio, sistema de frenos de camiones CAT 777C – 777D, series 4XJ, AGC, 5ER y 3PR. ....	55
Figura 21. Esquema neumático descriptivo del subsistema de frenos principales para camiones CAT 777C – 777D, series 4XJ, AGC, 5ER y 3PR. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR. ....	55
Figura 22. Esquema hidráulico descriptivo del subsistema de frenos principales para camiones CAT 777C – 777D, series 4XJ, AGC, 5ER y 3PR. ....	56

Figura 23. Taxonomía de subsistema de frenos secundarios y de liberación de parqueo, sistema de frenos de camiones CAT 777C – 777D, series 4XJ, AGC, 5ER y 3PR. ....	57
Figura 24. Esquema descriptivo del subsistema de frenos secundarios y de liberación de parqueo para camiones CAT 777C – 777D, series AGC. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR.....	57
Figura 25. Esquema descriptivo del subsistema de frenos secundarios y de liberación de parqueo para camiones CAT 777C – 777D, series 4XJ, 3PR y 5ER. ....	58
Figura 26. Compresor de aire de servicio de un camión CAT 777C – 777D. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR.....	59
Figura 27. Secador de aire de un camión CAT 777C – 777D. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR. ....	60
Figura 28. Tanques de almacenamiento de aire de un camión CAT 777C – 777D. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR.....	61
Figura 29. Válvula de protección del sistema neumático y sensor de presión. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR.....	62
Figura 30. Válvula de retardador manual, ubicada en cabina. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR. ....	63
Figura 31. Válvulas relay de frenos para los frenos de servicio, retardo manual y retardo automático. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR. ....	64
Figura 32. Vista seccional de la roto-cámara ENGANCHADA. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR. ....	65
Figura 33. Vista seccionada del ajustador de frenos en posición de liberación y en posición de enganchado. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR.....	66

Figura 34. Ubicación de válvula inversora de frenos en parte trasera de la cabina. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR.....	67
Figura 35. Matriz de criticidad de riesgos para valorar consecuencias de las fallas funcionales en el sistema de frenos de camiones CAT 777C – 777D. ....	74
Figura 36. Diagrama de decisión del proceso de RCM. 1997. Jhon Moubray. Reliabilty Centered Maintenance RCM II .....	76
Figura 37. Discriminación porcentual de los tipos de tareas seleccionados para las fallas funcionales del sistema de frenos. ....	77
Figura 38. Tipos de pm vs horas de trabajo de la máquina.....	78
Figura 39. Sección de entrenamiento con banco de pruebas de válvulas del Sistema de freno de camiones CAT 777C – 777D. Drummond Ltd. ....	81
Figura 40. Resultados de la evaluación de conocimientos en sistema de frenos de la primera semana de entrenamientos. Drummond Ltd. ....	82
Figura 41. Gráfica de weibull para tasa de fallas en el tiempo. 2017. Carlos Borrás P. Memorias de clase de Mantenimiento preventivo. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. UIS ...	84
Figura 42. Analisis de weibull para la bomba de liberación de frenos de camiones CAT 777C-777D. Drummond Ltd. Software usado WEIBULLEIM.....	86
Figura 43. Fotos de algunas bombas de liberación de frenos que han fallado. Drummond Ltd...	87
Figura 44. Fotos de algunas bombas de liberación de frenos que han fallado. Drummond Ltd...	87

**Lista de Apéndice**

Apendice A. Definición de funciones y realización de metodología AMFE para el sistema de frenos de camiones CAT 777C-777D.....	97
Apendice B. Selección de tareas de mantenimiento para el sistema de frenos de camiones CAT 777C – 777D.....	104
Apendice C. Análisis de criticidad para los modos de fallas del sistema de frenos de camiones CAT 777C – 777D.....	108
Apendice D. Programa de mantenimiento Actual para el sistema de frenos de camiones CAT 777C – 777D. Check list de pautas.....	116
Apendice E. Programa de mantenimiento actualizado para el sistema de frenos de camiones CAT 777C – 777D. Nuevo Check list de pautas .....	117
Apendice F. Costo aproximado de reparación por contaminación hidráulica para un camión CAT 777D.....	118
Apendice G. Formato para evaluación del sistema de frenos de camiones CAT 777C – 777D	120
Apendice H. Evaluación de conocimientos sistema de frenos de camiones CAT 777C-D.....	122
Apendice I. Formato para auditar enrutamiento de líneas hidráulicas.....	133

## RESUMEN

**TITULO:** MODELO DE GESTION DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN COFIABILIDAD (RCM) PARA EL SISTEMA DE FRENOS DE CAMIONES DE ACARREO CAT 777C-D DE LA EMPRESA DRUMMOND LTD<sup>1</sup>

**AUTORES:** LUIS HORACIO RUEDA CARREÑO  
OCTAVIO MAURICIO TORRES FUENTES<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVES:** MANTENIMIENTO, DISPONIBILIDAD, CONFIABILIDAD, MTTR, RCM, METODOLOGÍA.

### DESCRIPCIÓN:

El presente proyecto es una aplicación práctica de una metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad en el sistema de frenos de camiones CAT 777C y 777D que son empleados en la empresa Drummond LTD, en sus minas a cielo abierto Pribbenow y El Descanso, en el corregimiento de La Loma Cesar. Tiene como propósito realizar un análisis funcional y de modos de falla que permita mejorar la confiabilidad del sistema de frenos impactando positivamente la disponibilidad de los equipos y disminuyendo los elevados costos de reparación que se presentan cuando hay fallas en este sistema.

Se inicia con la definición de los límites de estudio y la taxonomía del sistema de frenos de los camiones de acarreo, posteriormente se define claramente las funciones del sistema y de los componentes que lo conforman, posibilitando la utilización de la herramienta AMFE para determinar los modos de falla probables para cada uno de los componentes y sus posibles efectos en el funcionamiento del sistema. Dichos efectos de falla serán valorados mediante una matriz de criterios que será previamente establecida según las normativas que rigen la metodología y ajustada al contexto operacional de la empresa Drummond LTD, en sus minas a cielo abierto Pribbenow y El Descanso.

En la fase final del proyecto se seleccionan las tareas a realizar, regidos por el árbol lógico de decisión propio de la metodología y se conforma un plan de trabajo a implementar. Este plan será comparado con el plan actual de mantenimiento para valorar el costo – beneficio de su implementación.

---

<sup>1</sup> Monografía de especialización

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento.  
Director: Cristian Vega de Lavalley, Especialista en Mantenimiento Industrial.

**ABSTRACT**

**TITLE:** MAINTENANCE MANAGEMENT MODEL CENTERED ON RELIABILITY (RCM) FOR THE CAT 777C-D TRUCK BRAKE SYSTEM OF THE DRUMMOND LTD COMPANY<sup>3</sup>

**AUTORES:** LUIS HORACIO RUEDA CARREÑO  
OCTAVIO MAURICIO TORRES FUENTES<sup>4</sup>

**PALABRAS CLAVES:** MAINTENANCE, AVAILABILITY, RELIABILITY, MTTR, RCM, METHODOLOGY.

**DESCRIPCIÓN:**

The present project is a practical application of a maintenance methodology centered on reliability in the CAT 777C-D truck brake system that are used in Drummond LTD company, in its opencast mines Pribbenow and El Descanso, La Loma Cesar. Its purpose is to perform a functional analysis and failure modes that allow to improve the reliability of the braking system, affecting positively the availability of equipment and reducing the high repair costs that occurs when there are faults in this system.

It begins with the definition of study limits and the taxonomy of the brake system of haul trucks, subsequently, the function of the systems and the components that make it up are clearly defined, making it the possible to use the AMFE tool to determine the probable failure modes for each of the components and their possible effects on the operation of the system. These effects of failure will be assessed through a matrix of criteria that will be previously stablished according to regulations that govern the methodology and adjusted to the operational context of the company. In the final phase of the project, the tasks to be carried out are selected, governed by the logical decision tree proper to the methodology and a work plan to be implemented to be implemented is stablished. This plan will be compared with the current maintenance plan to assess the cost – benefit of this implementation.

---

<sup>3</sup> Especialization monograph

<sup>4</sup> Faculty of Physical and Mechanical Engineering. Specialization in Maintenance Management. Director: Cristian Vega de Lavalle, Specialist in Industrial Maintenance.

## **Introducción**

Debido a los cambios recientes de las políticas mundiales para la conservación del medio ambiente en cuanto al uso de materias primas no renovables para la generación de energías, la empresa Drummond Ltd se ha alineado a estas para garantizar que su operación cumpla los estándares de calidad requeridas por los clientes.

Para lo anterior la empresa Drummond Ltd posee en su flota de camiones 777, 32 camiones adaptados como tanqueros de los 101 marca CATERPILLAR modelos 777C-D-F y 785A, los cuales, tienen como función principal el riego de las vías para controlar la alta polución generada debido a la misma operación.

En los últimos 3 años, en el lote de camiones 777C-D se han presentado contaminaciones del sistema hidráulico en 1 equipo cada mes y de los cuales el 80% de los casos se generan a raíz de problemas en el sistema de frenos. Estas contaminaciones generan daños cuyo costo de reparación pueden alcanzar hasta los U\$250000 solo en cambio de componentes, sin incluir la mano de obra y la afectación en el compromiso de la empresa con el medio ambiente debido a que los tanqueros se encuentran en reparación. A lo anterior se le suma la condición de seguridad del operador, ya que, una falla en el sistema de frenos puede ocasionar que el equipo no frene o que el equipo trabaje frenado, aumentando la temperatura del aceite y cambiando las características de lubricación causando deterioro en los componentes de la máquina.

Para darle solución a lo anteriormente, haremos uso de datos obtenidos en 4 años que corresponden a una muestra representativa de la flota de camiones carboneros y auxiliares en las minas Pribbenow y El Descanso, con tiempo de servicio de 12 años, sobre la cual realizaremos los

análisis y desarrollaremos e implementaremos un modelo de gestión de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) para el sistema de frenos de camiones de acarreo CAT 777C-D, logrando rediseñar el plan de mantenimiento del sistema de frenos aplicando la metodología basada en RCM, para así, identificar los elementos más críticos del sistema de frenos de los camiones CAT 777C-D en la mina Drummond Ltd y las nuevas frecuencias de cambio para los elementos más críticos del sistema de frenos de los camiones.

Con estos cambios generaremos grandes impactos mejorando la confiabilidad y disponibilidad de la flota 777C-D, reducción de grandes costos a partir de controles eficaces y eficientes y sin mencionar el cumplimiento de objetivos y requisitos en la actual certificación ambiental ISO 14001 que pretende conseguir la empresa Drummond Ltd para seguir alineado a las nuevas políticas mundiales, para así, seguir siendo sostenible y amigable con el medio ambiente y las comunidades vecinas, las cuales son las principales beneficiadas

## **1. Drummond Ltd**

Drummond Company Inc, es una empresa minera de los Estados Unidos dedicada a la exploración, explotación y exportación de carbón. En Colombia, desde mediados de los años 80`s Drummond Company Inc constituyó la sucursal conocida como Drummond Ltd para desarrollar el Proyecto Carbonífero La Loma, que se localiza en el departamento del Cesar, específicamente entre los municipios de El Paso, La Jagua de Ibirico y Chiriguaná; este proyecto también es conocido como

mina Pribbenow. Este proyecto comenzó los estudios de exploración a inicio de los años 90`s y finalmente en 1995 comienza con la explotación y exportación del mineral.<sup>5</sup>

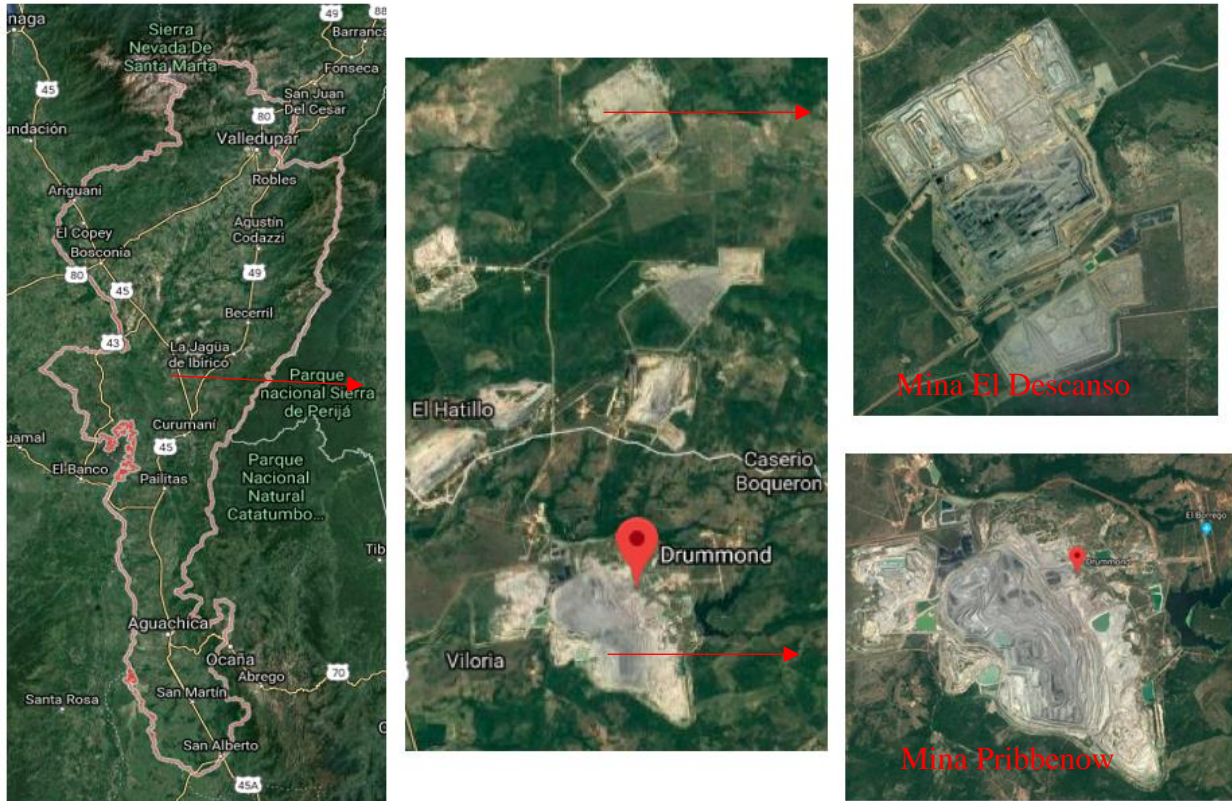
A partir del año 2009, Drummond Ltd también comienza la explotación del mineral en el proyecto conocido como mina El Descanso, que se encuentra ubicado 17 Km al norte de la mina Pribbenow. Entre ambos proyectos, se estima que Drummond Ltd tiene una reserva de más de 2.000 millones de toneladas. Actualmente, la empresa ha logrado exportar más de 32 millones de toneladas por año, cifra que ha conservado durante los últimos 2 años.

### **1.1. Procesos de Producción**

El proceso de explotación y transporte de carbón en las minas de Drummond Ltd se puede desglosar en 5 etapas: Planeación e Ingeniería de Producción; Perforación y Voladura; Carga y transporte de material estéril; carga y transporte de carbón; cargue de trenes y transporte hacía puerto.

---

<sup>5</sup> Drummond Ltd (2018). Quienes somos: Drummond en Colombia. Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://www.drummondLtd.com>



*Figura 1.* Localización geográfica de las minas Pribbenow y El Descanso. Tomado de <https://www.google.com/maps>.

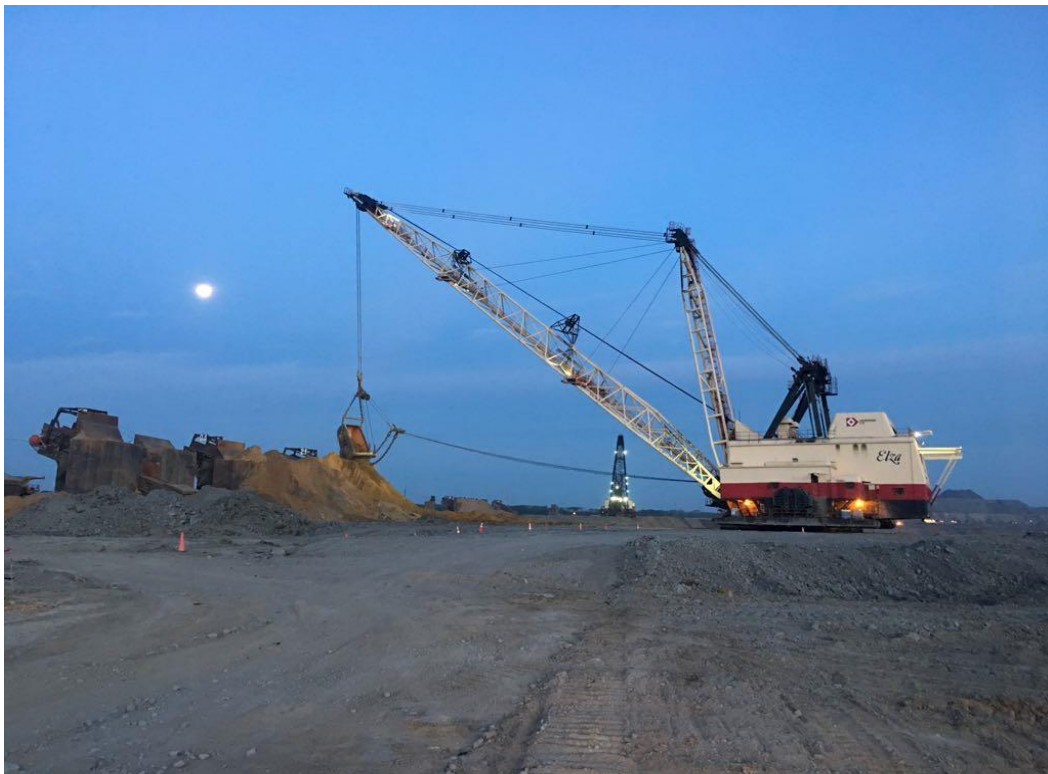
**1.1.1 Planeación e Ingeniería de Producción.** En esta etapa del proceso se establecen las metodologías de explotación del mineral, teniendo en cuenta los estudios geológicos y geotécnicos previos. Se seleccionan las áreas a intervenir, la maquinaria requerida, las zonas de acopio de los materiales removidos y las rutas de evacuación de estos materiales. Existen dos tipos de planeaciones, planeación a largo plazo y planeación a corto plazo. En la primera se definen las zonas principales de explotación, la creación de botaderos y retro llenados y la estructura vial de ambas minas. En la segunda, se definen las programaciones diarias de voladuras y se hacen ajustes a la producción de acuerdo a las condiciones ambientales dinámicas que se presentan.

**1.1.2 Perforación y Voladura.** Antes de poder extraer el carbón, se encuentran dos tipos de materiales con características diferentes. El primer material, o la primera capa de extracción es conocida como aluvión, el cual está constituido por sedimentos aluviales (arcilla y bandas de rocas de río) y alcanza una profundidad entre 30 y 60 metros; en la extensión de mina Pribbenow alcanza hasta 60m y en mina El Descanso no sobre pasa los 35 metros de profundidad. Remover este material se hace en una sola etapa usando palas hidráulicas o las dragalinas. La siguiente capa de material es mucho más dura y está constituida en su mayoría por rocas; para poder removerla es necesaria la implementación de un proceso de perforación y voladuras.



*Figura 2.* Taladro DRILTECH D 75K realizando perforaciones en mina El Descanso. Drummond Ltd.

La roca es perforada con taladros de gran capacidad y posteriormente se rellena con material explosivo a base de ANFO<sup>6</sup> para obtener rocas de menor tamaño que puedan ser extraídas por las palas y depositadas en los camiones de acarreo. El material explosivo es transportado y cargado en los agujeros con camiones articulados Caterpillar D250. Las voladuras son diseñadas y decididas por el departamento de ingeniería y planeación a corto plazo<sup>7</sup>, de acuerdo a las características propias de cada veta encontrada, los tamaños de roca deseados y las regulaciones ambientales.



*Figura 3.* Dragalina Elza, alimentación de Apron Feeder con aluvión. Mina El Descanso. Drummond Ltd.

---

<sup>6</sup> ANFO: Combinación de Nitrato de Amonio y Combustible Diesel. La relación usada es 50% ANFO y 50% emulsionantes.

<sup>7</sup> Actualmente, de acuerdo a las condiciones de producción se alcanzan a realizar hasta 5 voladuras diarias entre ambas minas.

**1.1.3 Carga y Transporte de material estéril.** Actualmente en las minas Pribbenow y El Descanso, se usan dos métodos para cargar y transportar el material estéril que es necesario remover para llegar a los mantos de carbón. Cada método es distinto de acuerdo al tipo de material que van a mover y a los costos de producción que implica.

- **Pala – Camión.** Es el método más común usado para cargar y transportar el material estéril. Una vez, se realiza la voladura del material rocoso, entran en el área palas hidráulicas (Komatsu o Hitachi) o palas eléctricas (Bucyrus), según lo designe planeación, para remover el material y cargarlo en los camiones de acarreo, la tabla 1 muestra la cantidad y tipos de palas que se emplean en Drummond Ltd. Los camiones de acarreo empleados para llevar el material estéril son de marca CAT referencia 793B, 793C, 793D y 793F, ver tabla 1, cuya capacidad es de 240 Ton. Con este método, en el año 2017 se movieron 230,7 Mbcm (Million Bank Cubic Meter) y en promedio cada camión tiene un tiempo de ciclo de 30.9 minutos.
- **Dragalina – Apron Feeder – Camion.** Con este método, en el año 2017 se movieron cerca de 14 Mbcm entre ambas minas. Inicialmente, las Dragalinas, que son máquinas de gran tamaño, por condiciones de productividad y estabilidad del terreno en su área de trabajo, son usadas para remover únicamente el aluvión. Con ellas se deposita el material sobre los apron feeder y estos a su vez depositan el material en los camiones de acarreo. Los Apron Feeder o alimentadores, es una estructura fija que está compuesta por una tolva, una banda de alimentación metálica y de superficie rugosa y un sistema hidráulico que gobierna el movimiento de todo el equipo. Los camiones de acarreo que se emplean para mover el aluvión son marca Komatsu referencia 830E.

**1.1.4 Carga y transporte de carbón.** Una vez retirada la capa de material estéril, la veta de carbón queda descubierta y se emplea el método tradicional de cargue con una pala y un camión de acarreo, con algunas variaciones. Los equipos que se usan para remover el mineral y depositarlo en los camiones son palas Palas Hidráulicas Komatsu de menor tamaño PC1000 y PC2000, Palas DEMAG H285 y H185, y cargadores de llantas Caterpillar 992C. Los camiones usados para transportar el carbón son Caterpillar 777C, 777D, 777F y 785A, equipos de menor capacidad (100 Toneladas) pero mucho más veloces. En el año 2017, se transportaron más de 14,1 millones de toneladas entre ambas minas.



*Figura 4.* Cargue de camión con pala hidráulica en zona de voladura. Mina El Descanso. Drummond Ltd. Tomado de <https://www.drummondLtd.com/nuestras-operaciones/mina>



*Figura 5. Extracción de aluvión proceso Dragalina – Apron feeder – Camiones Komatsu. Mina El Descanso. Drummond Ltd.*

Tabla 1.

*Tipos y cantidad de equipos de la flota más representativas en la empresa Drummond Ltd.*

<b>Flota de equipos</b>	<b>Características de los equipos</b>	<b>Tipo y cantidad de equipos</b>
<i>Camiones de 240 Toneladas</i>	Usados para el acarreo de material estéril y aluvión.	Camiones CAT 793B: 18 CAT 793C: 70 CAT 793D: 148 CAT 793F: 10 KOMATSU 830: 14 <b>Total: 260 equipos</b>
<i>Camiones Carboneros y Auxiliares</i>	Usados para: Acarreo de carbón. Riego de vías (tanqueros). Servicio de lubricación. Cama bajas.	Camiones CAT 769: 2 CAT 777B: 1 CAT 777C: 31 CAT 777D: 41 CAT 777F: 19 CAT 785A: 2

		<b>Total: 101 equipos</b>
<i>Cargadores</i>	Usados para arreglos de vías y para servicios de cargue de material estéril y carbón.	Motoniveladoras CAT 24M: 17 CAT 24H: 4 CAT 16M: 2 CAT 16G: 8 CAT 16H: 1  Camiones articulados CAT D250: 14 CAT 725: 1 Cargadores CAT 834B: 27 CAT 992C: 7 CAT 990: 2 CAT 980: 13 CAT 988: 13 CAT 928: 4 CAT 938: 7 CAT 525: 5 <b>Total: 125 equipos</b>
<i>Tractores</i>	Usados para: Empujar carbón en área de cargue o load out. Empujar material en zona de botaderos. Arreglo de vías. Empujar material en zona de apron feeders.	Tractores CAT D11R: 66 CAT D11T: 5 CAT D9L: 15 CAT D10R: 13 CAT D6: 7  Cargadores de tubos: CAT 583R: 4  Excavadoras: CAT 350L: 2 CAT 345DL: 7 CAT 345CL: 9 <b>Total: 126 equipos</b>
<i>Taladros</i>	Usados para hacer perforaciones en material estéril y en vetas de carbón. (proceso de voladura)	DRILTECH D75K: 9 DRILTECH D40K: 7 INGERSOLL RAND DMM3: 1 <b>Total: 17 equipos</b>

<i>Dragalinas</i>	Usados para remover y cargar aluvión.	Dragalinas BUCYRUS BE-2570: 1 BUCYRUS BE-1570: 1 MARION 8750: 1 <b>Total: 3 equipos</b>
<i>Palas</i>	Usados para remover y cargar material estéril y carbón.	DEMAG H 185: 1 DEMAG H 285: 3 KOMATSU PC 8000-8: 6 KOMATSU PC 8000-6: 14 KOMATSU PC 1000: 1 BUCYRUS 495HR: 4 HITACHI EX 3600-6: 4 HITACHI EX 1200-6: 4 <b>Total: 37 equipos</b>

---



*Figura 6.* Cargue de carbón, pala hidráulica PC1000 con camión de acarreo 777D. Mina Pribbenow. Drummond Ltd. Tomado de <https://www.drummondLtd.com/nuestras-operaciones/mina>

**1.1.5 Cargue de trenes y transporte hacia puerto.** El carbón es transportado hasta el load out por los camiones CAT 777, una vez se descarga, este es empujado hacia los trituradores y las bandas transportadoras por la acción de los tractores CAT D10 y D11. El carbón es triturado y mezclado según las características energéticas que requiera el cliente; en Drummond Ltd se

puede encontrar carbón con una capacidad calorífica en promedio de 11000 btu. Los trenes utilizados para esta labor constan de 3 locomotoras unidas que arrastran 150 vagones con capacidad de 50 toneladas cada uno, para una capacidad total de 7500 toneladas. Hoy por hoy, se despachan en promedio 15 trenes con el mineral hacía puerto.



*Figura 7.* Load out mina Pribbenow. Tomado de <https://www.drummond.com/nuestras-operaciones/mina>

### **1.2. Mantenimiento Equipo Móvil**

En las instalaciones de Drummond Ltd, todos aquellos equipos que tienen la habilidad de desplazarse constantemente dentro de sus áreas de trabajo y que incluso pueden cambiar su área de trabajo por sus propios medios, son caracterizados como móviles. El ejercicio de mantener todos estos equipos está a cargo del Departamento de Mantenimiento equipo móvil, departamento en el que hábilmente se clasifican y agrupan los equipos en distintas áreas teniendo en cuenta sus

características similares; de esta manera tenemos las siguientes áreas: equipo liviano y lubricación, cargadores, Tractores, Camiones 240 toneladas y Camiones carboneros y auxiliares

**1.2.1 Mantenimiento camiones 240 toneladas.** En esta área de mantenimiento se presta servicio a toda la flota de camiones de acarreo de gran capacidad, entre estos están CAT 793B, 793C, 793D, 793F y Komatsu 830E. Actualmente esta flota de camiones posee 260 equipos.



*Figura 8.* Camiones CAT 793D siendo cargados por una pala BUCYRUS 495HR en mina Pribbenow. Drummond Ltd.

**1.2.2 Mantenimiento camiones carboneros y auxiliares.** En esta área de mantenimiento se atiende la flota de equipos de acarreo de carbón: CAT 777C, 777D, 777F y 785A. Adicionalmente, se presta servicio a equipos auxiliares como: Tanqueros (777C – D adaptados para riego de vías), Camiones lubricadores (777 adaptados para transportar combustibles y aceites), y camabajas (785 adaptados para remolcar equipos varados y transportar equipos de oruga por distancias prolongadas). Actualmente esta flota posee 101 equipos.



*Figura 9.* Equipo carbonero CAT 777D. Mina El Descanso. Drummond Ltd.

**1.2.3 Mantenimiento cargadores.** Esta área de mantenimiento es la encargada de atender toda la flota de equipos CAT de llantas con la excepción de los camiones anteriormente mencionados. Es una flota muy variada con números modelos de equipos, entre los que se resaltan los siguientes: Cargadores frontales CAT 998 y 992, Motoniveladoras CAT 16 H, 24H y 24M, Camiones articulados CAT D250, Montacargas Hyster, Tractores de llantas, entre otros. Actualmente esta flota posee un total de 125 equipos.



*Figura 10.* Equipo CAT 777D usado como tanquero. Mina Pribbenow. Adaptado de Marin, Adolfo (2017), Modelo de Gestion de mantenimiento centrado en confiabilidad para el sistema de riego de camiones tanqueros de la empresa Drummond Ltd.



*Figura 11.* Motoniveladora CAT 24M en arreglo de vías, mina El Descanso. Drummond Ltd.

**1.2.4 Mantenimiento tractores.** En esta área se presta servicio de mantenimiento a toda la flota de tractores de oruga y excavadoras, entre estos tenemos: Tractores CAT D11R, D11N, D11T, D10R, D9, D6, Excavadoras CAT 350, 345, 330 y 320. Actualmente la flota posee un total de 126 equipos.



*Figura 12.* Tractor D11R en taller de mantenimiento. Mina El Descanso. Drummond Ltd.

**1.2.5 Mantenimiento equipo liviano.** En esta área se encargan de mantener todas las camionetas de transporte de personal y todos los camiones medianos usados para transporte de herramientas, aceites, combustibles y otros equipos de soporte como compresores, motosoldadores y luminarias. Adicional a esto, también se encargan de dar el soporte de proporcionar aceites y combustibles a toda la maquinaria que trabaja en las minas.

## 2. Planteamiento del problema

La empresa Drummond LTD, en sus operaciones a cielo abierto en las minas Pribbenow y El Descanso, cuenta con un Departamento de equipos carboneros y auxiliares, que consta de 101 camiones marca CATERPILLAR modelos 777C-D-F y 785A, de los cuales 69 de ellos permiten el acarreo del carbón desde los pits de explotación hacia el load out o centro de acopio del mineral, y los otros 32 son usados como equipos tanqueros que tienen como función principal el riego de las vías para controlar la alta polución.

Dentro de la flota, se tienen un total de 72 camiones de acarreo modelos CAT 777C-D, estos equipos tienen en promedio 12 años de trabajo con la compañía (no todos fueron adquiridos como nuevos) sumando un total de 72000 horas de servicio cada uno aproximadamente. Actualmente la compañía, en su departamento de mantenimiento no tiene una política establecida para la realización de overhaul a los equipos, todas las renovaciones y reparaciones de componentes y sub componentes de los distintos sistemas (dirección, motor, frenos, tren de potencia, levante, chasis) se realiza de acuerdo a la condición de trabajo, que es monitoreada constantemente mediante inspecciones y muestras de aceites, de aquí que en la mayoría de equipos se pueden encontrar elementos con altas horas de servicio.

En los últimos 3 años, en el lote de camiones 777C-D se han presentado contaminaciones del sistema hidráulico en 1 equipo cada mes, estas contaminaciones generan daños cuyo costo de reparación pueden alcanzar hasta los US\$250000 solo en cambio de componentes, sin incluir la mano de obra. Del total de todos los casos, el 80% de las contaminaciones se generan a raíz de problemas en el sistema de frenos. Una falla en el sistema de frenos puede ocasionar que el equipo no frene, condición de seguridad del operador, o que el equipo trabaje frenado, aumentando la

temperatura del aceite y cambiando las características de lubricación causando deterioro en los componentes de la máquina.

Lo anterior plantea para la gerencia de mantenimiento de camiones carboneros y auxiliares un importante problema a resolver que consiste en reestructurar el programa de mantenimiento actual, diseñando un plan de mantenimiento preventivo basado en confiabilidad (RCM) para el sistema de frenos en la flota de camiones Carboneros y Auxiliares para las minas Pribbenow y El Descanso.

Actualmente no se cuenta con estrategias para determinar la vida útil de cada uno de los componentes que conforman el sistema de frenos, pero se conoce el valor de cada uno de los componentes, los cuales son poco representativo a los costos totales de reparación cuando se contamina el sistema. El presente proyecto busca una solución a tiempo del problema, enfocando esfuerzos para identificar la vida útil promedio de los componentes del sistema de freno y extender al máximo estos sin afectar el sistema total, introduciendo nuevos controles en periodos de tiempos definidos.

Dentro de este contexto se ha seleccionado los datos obtenidos en 4 años que corresponden a una muestra representativa de la flota de camiones carboneros y auxiliares en las minas Pribbenow y El Descanso, con tiempo de servicio de 12 años, sobre la cual se realizarán los análisis y el diseño de RCM, de modo que la empresa no se vea afectada en sus indicadores.

### **3. Objetivos**

#### **3.1.Objetivo general**

Rediseñar el plan de mantenimiento del sistema de frenos de los camiones CAT 777C-D, a través del desarrollo de un modelo de gestión de mantenimiento centrado en confiabilidad.

#### **3.2.Objetivos Específicos**

- Aplicar una metodología basada en RCM que permita identificar cuáles son los elementos más críticos del sistema de frenos de los camiones CAT 777C-D.
- Determinar nuevas frecuencias de cambio para los elementos más críticos del sistema de frenos de los camiones CAT 777C-D
- Realizar una actualización del plan de mantenimiento preventivo de los camiones CAT 777C-D.

#### **4. Justificación del plan propuesto**

Drummond Ltd es una empresa carbonífera que ha realizado labores de exploración, explotación y exportación de carbón en el departamento del Cesar por un período de más de 20 años y ha alcanzado cifras record de producción que alcanzan los 32 millones de toneladas. Para la realización de sus labores, Drummond Ltd cuenta con un amplio lote de equipos mineros, muchos de ellos especializados en determinadas labores como el acarreo del carbón y el riego de vías para el control de la polución. La mayoría de estos equipos tienen una larga vida de servicio y por ende su plan de mantenimiento debe ser más exigente para poder obtener una disponibilidad operativa deseada.

El panorama actual para la flota de camiones carboneros y auxiliares muestra que los equipos de acarreo y los equipos tanqueros no están alcanzando la disponibilidad esperada de manera sostenible en el tiempo. El principal objetivo de los líderes de la flota es identificar claramente la causa raíz de las fallas de mayor impacto y definir las estrategias adecuadas para controlar su efecto y poder mantener la confiabilidad deseada. Semana a semana se llevan indicadores que permiten identificar los mayores problemas que impactan significativamente la confiabilidad y disponibilidad de la flota, y se toman acciones en pro de mejorar las condiciones, pero en gran parte de los casos, estas acciones son de manera reactiva y solo permite controlar las consecuencias de las fallas presentes y no el origen de estas.

Uno de los temas que más afectan la disponibilidad de los equipos de la flota son las contaminaciones hidráulicas en los camiones CAT 777C-D, a raíz de problemas en el sistema de frenos. Entre el mes de junio del año 2014 y el mes de diciembre de 2017 se presentaron alrededor

de 42 equipos contaminados, para un promedio de 1 por mes, de los cuales el 80% corresponden a consecuencias por fallas en el sistema de frenos. Algunas de las reparaciones han llegado a costar hasta U\$250000 y en promedio se requieren aproximadamente 500 horas para su atención, variable que se ve afectada por la disponibilidad de repuestos y el recurso humano disponible de acuerdo a las prioridades diarias de la flota.

Implementar la metodología de RCM en el mantenimiento del sistema de frenos de los equipos CAT 777C-D permitiría orientar adecuadamente los esfuerzos del grupo de trabajo, permitiendo identificar claramente todos los modos de falla y la relevancia de sus consecuencias, y así poder gestionar las estrategias necesarias para obtener la disponibilidad deseada. Adicionalmente, se mejora el plan de mantenimiento, las fallas podrían ser corregidas con anticipación, los recursos se optimizarían y los costos del departamento disminuirían significativamente.

## **5. Análisis Literatura Recopilada**

### **5.1. Marco Teórico**

Los escenarios actuales de mantenimiento de muchas empresas del sector minero tienen la tendencia a trabajar en un escenario muy conservador, que genera tiempos de reparación elevados y una relación costo efectiva no muy buena, en otras palabras, se basa en actividades reactivas, preventivas y en algunos casos predictivas. El mantenimiento preventivo ofrece muchas actividades que gran parte de las veces son innecesarias o muy conservadoras, que al final acarrear mayores tiempos de reparación y altos costos de operación. Esto se debe a que se trabaja con base a muchos paradigmas y suposiciones, tales como: recomendaciones de fabricantes (en su mayoría

son muy conservadoras y promueven el consumo de partes de repuesto); toda falla es mala y debe ser prevenida (opción muy poco costo – efectiva).

De esta manera, los retos claves para cualquier estructura de mantenimiento deben tener en cuenta lo siguiente:

- Seleccionar las mejores técnicas
- Manejar los procesos de cada tipo de falla
- Tener la mejor relación costo – efectividad
- Tratar las expectativas de los dueños de los equipos, los operadores de los equipos y de la sociedad como un todo.

Ante este panorama, es necesario tener una estrategia de trabajo que pueda reducir los trabajos de mantenimiento a su mínima expresión sin afectar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos, la seguridad de los trabajadores y la integridad del medio ambiente. El enfoque de RCM surge como la estrategia que combina todas las necesidades anteriormente expresadas y como se ha demostrado en el campo de la aviación, uso militar, minas de carbón, etc, su aplicación aumenta la disponibilidad de equipos y seguridad en las plantas mientras disminuye los costos de mantenimiento.

**5.1.1 Definición de RCM.** Es una metodología que permite enfocar, de manera efectiva, todas las actividades de mantenimiento en las necesidades establecidas para controlar cada uno de los modos de falla que se identifican en los distintos equipos y/o sistemas. Otras definiciones formales pueden ser:

- Es un proceso usado para determinar los requerimientos de mantenimiento para cualquier equipo físico en su contexto de operación (Moubray, 1997).

- Es una metodología que permite preservar las funciones, identificar los modos de falla, priorizar necesidades y seleccionar tareas aplicables y efectivas (Deshpande y Modak, 2002).

En general, RCM se enfoca en el funcionamiento de los sistemas y su interacción con el medio, se empieza a mirar la máquina, el medio ambiente y la seguridad de las personas como una sola cosa. Si un equipo tiene el mejor diseño y otorga muy buena confiabilidad desde un principio, pero no realizan las tareas de mantenimiento adecuadas, la confiabilidad empieza a verse afectada y el medio en el que opera también.

Otro de los grandes beneficios de la aplicación de la metodología de RCM es la generación de un histórico de reparación para cada uno de los componentes, equipos y/o sistemas a los cuales se les aplica. Este histórico diferencia claramente los modos de falla y los controles establecidos cada uno de ellos.

**5.1.2 Historia y evolución del RCM.** El mantenimiento ha tenido una evolución marcada en 3 grandes generaciones que han dado paso entre sí, de acuerdo a las necesidades del mundo en cada una de ellas. La tabla 2 muestra con detalle cada una de las expectativas que se han tenido en cada generación.

La *Primera generación de mantenimiento*, data de los años 30's hasta los años 50's, cubriendo el período de la segunda guerra mundial, donde la industria no estaba muy mecanizada y la mayoría de las máquinas eran sobredimensionadas y de funcionamientos simples. En esta época las actividades de mantenimiento eran muy sencillas y no iban más allá de simples inspecciones y rutinas de lubricación, hasta cambio de piezas que quedaban fuera de servicio, en general no se requería de un mantenimiento sistemático. En la *Segunda generación de mantenimiento*, que data

desde los años 50's hasta los años 70's, se ve un incremento bastante notorio en la mecanización de las empresas y en la innovación de estas siendo cada vez más complejas en su funcionamiento. Aquí, se introduce el concepto de mantenimiento preventivo o PM, donde se realizaban rutinas de inspección y cambio de piezas en intervalos regulares; generando también la necesidad de incluir sistemas de control y labores de planeación que permitieran llevar un control de los costos de mantenimiento. Al final de esta generación, el mantenimiento preventivo (PM) consistía únicamente en cambio general de componentes en rangos de tiempo establecidos.

Por último, la *Tercera generación de mantenimiento*, que data desde los años 70's hasta la actualidad, se ve marcada debido a los cambios en la industria, los cuales, han sido re potencializados y la inclusión de mayores tecnologías y sistemas de automatización en la maquinaria se han presentado de manera exponencial. Con el aumento del mecanizado y la automatización, los indicadores de disponibilidad y confiabilidad empezaron a tomar mayor fuerza y requieren que aspectos como calidad, seguridad, medio ambiente y larga vida de equipos sean controlados de manera efectiva para no impactar los costos de mantenimiento. En esta generación se introducen otros conceptos respecto a los modos de falla, a diferencia de la segunda generación donde solo se usaba la teoría de la curva de la bañera; se usan 6 teorías distintas respecto a los modos de falla, ver figura 14.

Tabla 2.

*Evolución del mantenimiento.*

<b>Primera Generación (1940's, 1950's)</b>	<b>Segunda Generación (1960's, 1970's)</b>	<b>Tercera Generación (1980's, 2000)</b>
<i>Expectativas de crecimiento:</i> Arreglar las cosas cuando estén dañadas.	<i>Expectativas de crecimiento:</i> Mayor disponibilidad de planta. Mayor vida de los equipos. Disminución de costos.	<i>Expectativas de crecimiento:</i> Mayor disponibilidad y confiabilidad de las plantas. Mejor calidad de productos. Evitar daños al medio ambiente. Mayor vida de los equipos. Mayor efectividad en los procesos. Mayor protección del recurso humano.
<i>Técnicas de mantenimiento:</i> Reparar las cosas cuando estén dañadas.	<i>Técnicas de mantenimiento:</i> Uso de sistemas para planeación y control de trabajos. Aparecen grandes y lentas computadoras.	<i>Técnicas de mantenimiento:</i> Monitoreo de condiciones. Diseños para confiabilidad y mantenibilidad. Estudio de peligros. Aparecen computadoras más rápidas. Análisis de modos y efectos de fallas. Equipos de trabajo multifuncionales.
<i>Modelo de Mantenimiento:</i> Mantenimiento correctivo.	<i>Modelo de mantenimiento:</i> Mantenimiento basado en la teoría de la curva de la bañera.	<i>Modelo de Mantenimiento:</i> Monitoreo de condiciones. Mantenimiento productivo total (TPM). Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM).

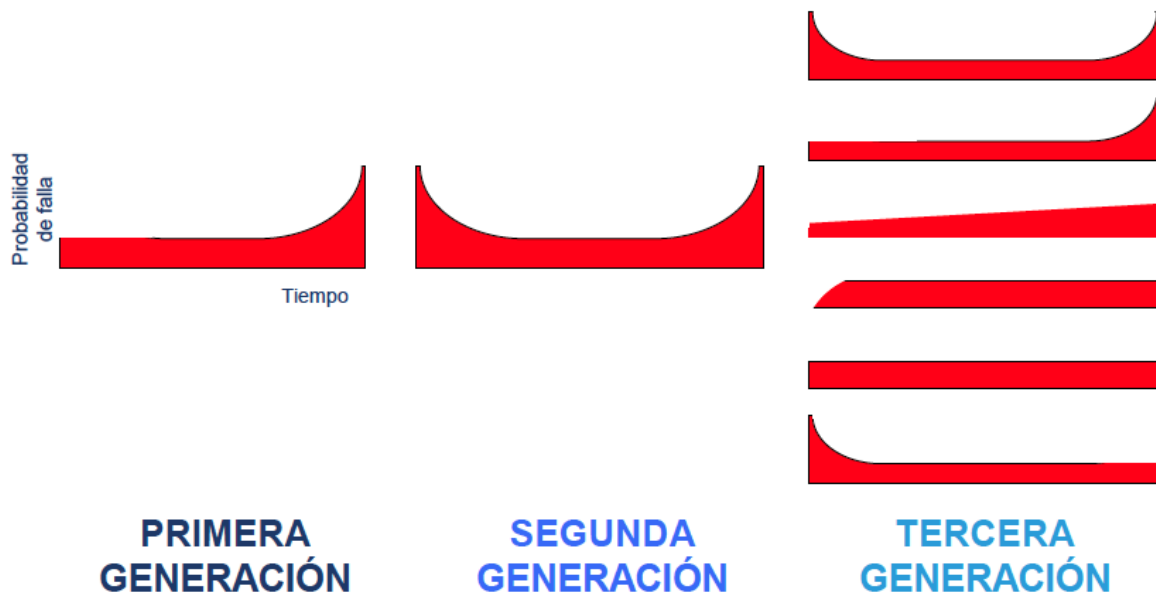


Figura 13. Modos de Falla de acuerdo a la generación del mantenimiento (1997). Jhon Moubray. RCM II

Para poder implementar y controlar los nuevos desarrollos tecnológicos en las labores de mantenimiento se requiere de un grupo de trabajo con mejores pensamientos organizacionales, que permitan seleccionar correctamente las mejores técnicas conservando el estado de los equipos y el margen de costos. Con todas las nuevas variables que empiezan a conformar el mundo del mantenimiento, el costo empezó a elevarse y a ser uno de los principales protagonistas en todas las empresas, siendo el mantenimiento preventivo convencional no muy funcional para estos objetivos.

La tercera generación de mantenimiento entendió muy bien los requerimientos necesarios para continuar y se enfocó en analizar desde cero cada uno de los requerimientos de los equipos en su contexto de operación, dando paso a la implementación de RCM. El concepto de RCM fue desarrollada en los años 70's por un grupo de mantenimiento que trabajaba para una importante aerolínea con el objetivo de reducir los tiempos de reparación, los costos de mantenimiento y mejorar la seguridad de los vuelos. El mismo concepto fue acogido por la Asociación de Transporte Aéreo, la Asociación de Manufactura Aeroespacial y la Agencia Federal de Aviación de los Estados Unidos (AFA). Se creó la nueva filosofía de RCM y fue conocida como MSG-1, siendo aplicada inicialmente para el diseño de mantenimiento del avión Boing 747. Más adelante, usando la técnica de diagrama de decisión se realizaron mejoramientos a la filosofía de RCM y nació el MSG-2, documento acogido por los fabricantes de aviones para el planeamiento de los programas de mantenimiento; a partir de aquí, la metodología empezó a ser aplicada por la aviación táctica militar de los Estados Unidos. La última actualización, el MSG-3, ha sido revisada 4 veces, 1988 – 1993 – 2001 – 2003. La metodología de RCM permitió que las aerolíneas y las bases militares obtuvieran resultados muy satisfactorios en todas las labores de mantenimiento, mientras que ahorran mucho dinero y evitaban gastos innecesarios. Con este método, se reduce a su mínima

expresión la cantidad de cambios de componentes por rango de horas (overhaul), ahorrando mucho dinero de mantenimiento; este efecto se extiende también hasta los departamentos de materiales donde los inventarios son reducidos.

En los años 80's el concepto de RCM fue incluido en la industria nuclear de los Estados Unidos, logrando una disminución entre el 30-40% en horas de labor de mantenimiento y costos de materiales. La metodología de RCM ha sido incluida de manera satisfactoria en la industria de los granos, las minas de carbón a cielo abierto, industria de papel, refinerías de petróleo y gas, entre otras; y es considerada como una iniciativa que permite optimizar el uso de todos los recursos de mantenimiento, el tiempo y el dinero de las empresas.

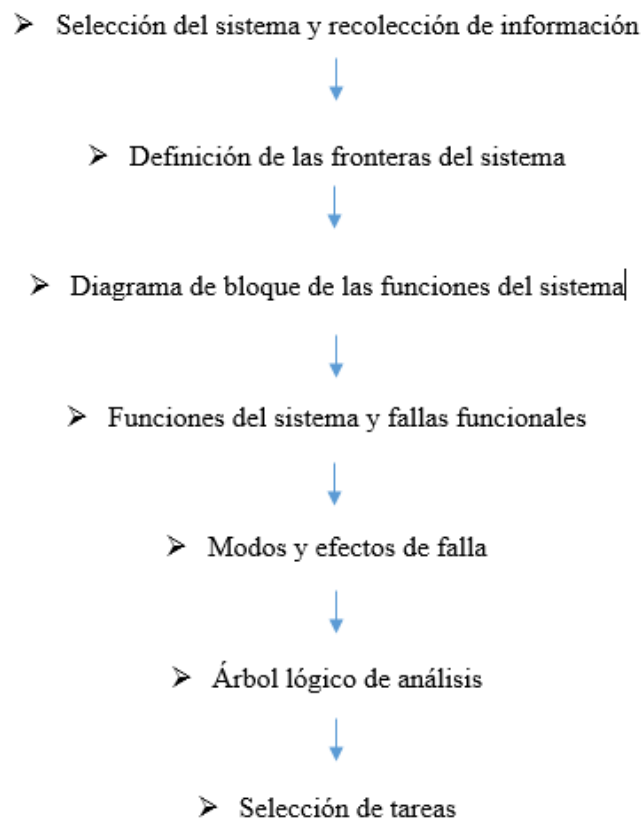
**5.1.3 Metodología de RCM.** Para implementar la metodología de RCM en cualquier proceso, se debe responder satisfactoriamente las siguientes preguntas, sin olvidar que se debe mantener el orden entre estas.

- ¿Cuáles son las funciones deseadas y los estándares de desempeño asociados del activo en su contexto operacional presente (funciones)?.
- ¿De qué manera puede fallar al cumplir sus funciones (fallas funcionales)?
- ¿Qué causa cada falla funcional (modos de falla)?
- ¿Qué pasa cuando ocurre cada falla funcional (efectos de falla)?.
- ¿De qué manera afecta cada falla (consecuencias de falla)?.
- ¿Qué se debe hacer para prevenir o predecir cada falla (tareas proactivas e intervalos de tareas)?.

- ¿Qué se debe hacer si una tarea proactiva que conviene no está disponible (acciones predeterminadas)?

En la figura 14 se observa, mediante un diagrama de flujo, los 7 cuestionamientos propuestos con anterioridad.

- Selección de sistemas y recolección de información; es el punto de partida para el análisis de RCM, siendo considerados varios factores como tareas de pm, tareas correctivas, costos, seguridad, medio ambiente. En esta etapa es importante recolectar toda la información posible: diagramas, manuales de partes y de operación, historiales de reparación, entre otras.



*Figura 14.* Diagrama de flujo para una metodología RCM (2002). Deshpande y Modak. Application of RCM to a médium scale industry. Reliability engineering and system safety 77.

- Definición de las fronteras del sistema, es de las fases más importantes y en algunos sistemas se pueden establecer de manera física y en otros por definición de flujos y comportamientos del sistema mismo. Se resaltan dos aspectos muy importantes; primeramente, permite definir las funciones más importantes de los elementos que están dentro de la frontera y por último permite identificar claramente que es lo que entra (flujos, temperaturas, energía mecánica, productos, etc.) y que es lo que sale de todo el sistema seleccionado.
- Descripción del sistema y diagrama de bloque funcional; en esta etapa existen 5 importantes niveles que deben ser desarrollados:
  - I. La descripción del sistema muestra las descripciones funcionales, sus características de protección, etc.
  - II. Un diagrama de bloque funcional muestra el orden jerárquico de las funciones del sistema.
  - III. Estable las interfaces de entradas / salidas.
  - IV. Establece una estructura de descomposición de trabajo en el sistema que recopila equipos para cada una de las funciones de los subsistemas que componen el diagrama.
  - V. Tener historia de reparación de todos los equipos de por lo menos 2 años atrás.
- Funciones del sistema y fallas funcionales. Con toda la información reunida en los pasos anteriores se reúne lo necesario para cumplir con el primer principio de RCM, “preservar las funciones del sistema”. El desarrollo e identificación de las interfaces de SALIDA provee la primera fuente de información para definir las funciones del sistema. Al capturar

cada interfaz de salida se definen las funciones de los subsistemas, que a su vez construyen las funciones del sistema en general. En esta etapa es importante resaltar que se analizan las fallas funcionales, más no las fallas en los equipos.

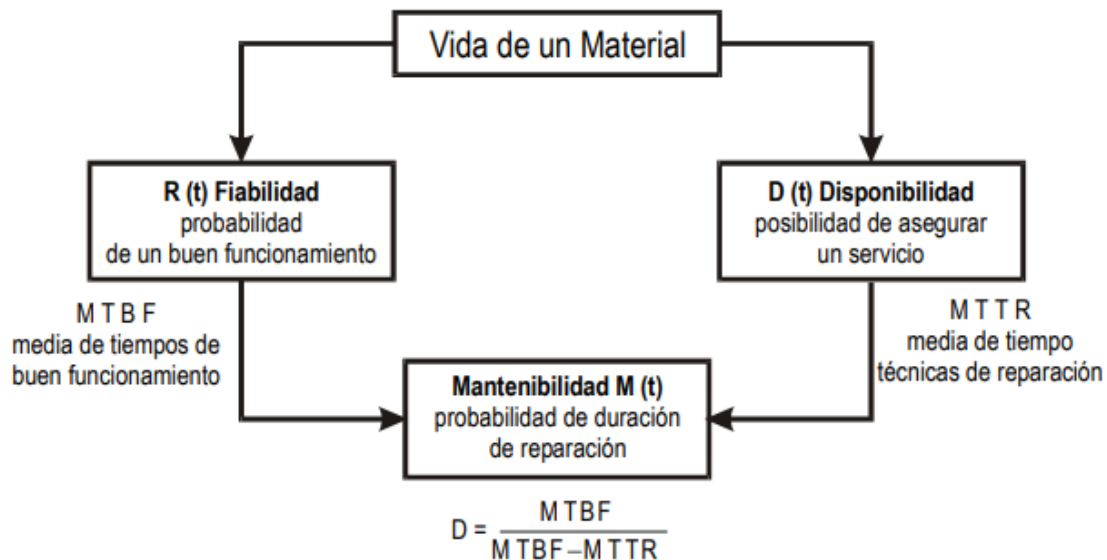
- Análisis de modos y efectos de falla. En esta etapa se deben realizar dos grandes análisis. Primeramente, se debe realizar una “matriz de identificación de fallas funcionales de los equipos” donde se busca establecer cuáles son los equipos que tienen un rol importante en la creación de una falla funcional. Por otra parte, se debe realizar un “FMEA” con el objetivo de definir los modos de falla de los componentes (como falla el componente para generar una falla funcional) y su respectivo análisis de causa raíz (razón básica). Estos modos de falla pueden ser de tres niveles, nivel de equipo, nivel de sistema y nivel de planta.
- Árbol lógico. En este análisis se plantea esclarecer cuales son las fuentes dadas para cada falla, encontrando una relación lógica entre cada función del sistema, falla funcional y modo de falla.
- La selección de tareas en el proceso de RCM requiere que cada tarea encontrada sea sometida a una prueba que permita definir si es, en primera instancia, APLICABLE (previene o mitiga la falla ó descubre una falla oculta) y por último, EFECTIVA (es la opción más costo-efectiva). Si en un RCM no se encuentra una tarea que cumpla con las condiciones anteriores, se debe “correr a falla” (RTF, Run to failure), siendo la única excepción cuando la falla involucrada afecta la seguridad de las personas; en estos casos se debe realizar un rediseño obligatoriamente.

## 5.2.Marco Conceptual

**5.2.1 Fiabilidad.** Es la probabilidad de que un equipo pueda realizar su función requerida durante un rango de tiempo determinado y bajo condiciones definidas.

**5.2.2 Disponibilidad.** Es un indicador que permite medir el tiempo en que un equipo está funcionando como se debe.

**5.2.3 Mantenibilidad.** Es la probabilidad del equipo en ser reparado/mantenido durante un tiempo determinado.



*MTBF*: promedio de tiempos de buen funcionamiento de un equipo

*MTTR*: Tiempo medio de reparación.

*Figura 15.* Relación entre fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad. Obtenido de <http://www.mantenimientomundial.com/sites/libro/Torres/Parte1.pdf>

**5.2.4 Fallas de causa común.** Son fallas de múltiples componentes, pero independientes uno del otro, dando como resultado una causa común.

**5.2.5 Fallas de modo común.** Son fallas de múltiples componentes, pero son caracterizados en el mismo modo de fallo.

**5.2.6 Mantenimiento.** Combinación de acciones técnicas y de gestión, que permiten retener y restaurar un equipo para que realice la función por la cual ha sido adquirido.

- **Mantenimiento correctivo:** Es aquel mantenimiento que se realiza después de haber ocurrido un fallo y suele considerarse como una reparación.
- **Mantenimiento preventivo:** Es considerado una actividad planificada para lograr que un sistema u equipo funcione correctamente. Se basa en la prevención y reducción en el índice de frecuencias en las fallas comunes y prematuras mitigando sus consecuencias. Se subdivide en dos tipos:
  - *Mantenimiento preventivo condicional:* Se basa en sucesos determinados los cuales fueron entendidos por medio de pruebas, diagnósticos o mediciones
  - *Mantenimiento preventivo sistemático:* Es aquel que se realiza mediante un programa previamente establecido, en donde prevalece el funcionamiento y el tiempo de uso de los componentes medidos en unidades horarias.
  - *Mantenimiento predictivo:* Consiste en determinar las condiciones de los equipos sin interrumpir su funcionamiento. Esto mediante monitoreo periódico o permanente de variables por medio de pruebas de vibraciones, ultrasonido, amperaje, aceites o temperatura para luego ser comparadas y determinar las acciones y el momento adecuado del mantenimiento del equipo.

## **6. Desarrollo metodológico del RCM**

### **6.1. Organización**

La aplicación de la metodología de RCM requiere de información de buena calidad respecto al funcionamiento de los equipos o sistemas que son objeto de estudio, en este caso un sistema; y de la recolección de datos históricos propios de este. Siendo así, es necesario integrar un grupo de trabajo multidisciplinario que permita cumplir estos requisitos. En la figura 17 se muestra un diagrama con el detalle de los integrantes del grupo de trabajo.

### **6.2. Delimitación del sistema de estudio**

Una descripción clara de las fronteras de un sistema objeto de estudio es totalmente imperativa para recolectar, procesar y analizar datos de confiabilidad y mantenimiento. Como se ha manifestado al inicio de este documento, se tomará como centro de estudio el sistema de frenos de los camiones CAT 777C-D, que funcionan como equipos de acarreo de carbón, tanqueros y lubricadores en las instalaciones de la empresa Drummond Ltd.

El camión CAT 777D es considerado un camión pequeño en comparación con otros modelos como los 785, 789, 793 y 797, que son capaces de transportar mayor carga; sin embargo, son equipos mucho más rápidos y recomendados para recorrer grandes distancias. La capacidad de acarreo de los camiones 777D, al igual que los 777C, es de 100 Toneladas y su peso vacío es de 65 Toneladas aproximadamente, en la tabla 3 se pueden observar otras características técnicas y

operacionales. En la empresa Drummond Ltd se tienen 41 equipos 777D y 31 equipos 777C<sup>8</sup> que son usados para acarreo de carbón, como equipos tanqueros para riego de vías y como equipos lubricadores para brindar soporte a todos los equipos fijos distribuidos en ambas minas. Los camiones 777C son de serie 4XJ y los camiones 777D son de serie AGC, 5ER y 3PR.



Figura 16. Equipo de trabajo para el desarrollo del RCM.

La figura 17 muestra los sistemas principales de un camión 777C-D. En general, los camiones CAT 777C y CAT 777D poseen diferencias entre sus sistemas, pero en el sistema de frenos, que es nuestro objeto de estudio, son muy similares; sin embargo, hay diferencias puntuales que deben ser tenidas en cuenta. De esta manera, se establecerán taxonomías diferentes dependiendo de la serie del equipo. Las series 4XJ, 5ER y 3PR manejan la misma configuración para el sistema de

<sup>8</sup> Los modelos CAT 777D y CAT 777C poseen diferencias, pero en el sistema de frenos, que es nuestro objeto de estudios son muy similares.

frenos y la serie AGC posee una distinta, estas diferencias serán mencionadas en el desarrollo de este documento.

Tabla 3.

*Características técnicas de los camiones 777D*

Componente	Descripción del componente	Características del componente	
<i>Motor</i>	Modelo motor	Cat 3508B EUI	
	Potencia Bruta-SAE J1995	746 kW	1000 hp
	Poder de la red – SAE J1349	699 kW	938 hp
	Poder de la red – Cat	699 kW	938 hp
	Potencia del volante	699 kW	938 hp
	Poder de la red – ISO 9249	699 kW	938 hp
	Poder de la red – 80/1269/EEC	699 kW	938 hp
	Par máximo	4713 N·m	3.476 lb ft
	Aumento de par	23%	
<i>Pesos - Aproximado</i>	Peso de operación de la máquina con carga	163360 kg	360143 lb
	Peso de operación de la máquina sin carga	64670 kg	142573 lb
<i>Especificaciones de operación</i>	Capacidad nominal de carga útil	90.4 Tn	100 Tn
	Capacidad del cuerpo – Golpeado	42.1 m <sup>3</sup>	55.06 yd <sup>3</sup>
	Capacidad del cuerpo – SAE 2:1	60.1 m <sup>3</sup>	78.6 yd <sup>3</sup>
<i>Transmisión</i>	Cambio 1	10.5 km/h	6.5 mph
	Cambio 2	14.3 km/h	8.9 mph
	Cambio 3	19.3 km/h	12 mph
	Cambio 4	26 km/h	16.2 mph
	Cambio 5	34.9 km/h	21.9 mph
	Cambio 6	46.6 km/h	29.4 mph
	Cambio 7	60.4 km/h	39.9 mph
	Reversa	11.9 km/h	7.4 mph
<i>Mando Final (Planetario, flotante completo)</i>	Proporción diferencial	2.74: 1	
	Proporción planetaria	7.00: 1	
	Proporción de reducción total	19.16: 1	
<i>Distribuciones de peso: aproximado</i>	Eje delantero vacío	47%	
	Eje delantero cargado	33%	
	Eje trasero vacío	53%	
	Eje trasero cargado	67%	
<i>Suspensión</i>	Carrera de cilindro efectiva – Frente	318 mm	12.5 in
	Carrera de cilindro efectiva – Trasera		
	Oscilación del eje trasero	165 mm	6.5 in
<i>Pesos aproximados - Pendiente doble</i>	Vehículo vacío	5.4°	
	Chasis		
	Cuerpo	64670 kg	142573 lb
		46600 kg	107144 lb
		16070 kg	35428 lb
<i>Capacidad de recarga de servicio</i>	Tanque de combustible		
	Sistema de enfriamiento		
	Caja de cigüeñal	1137 L	300 gal
	Diferenciales y mandos finales	268 L	71 gal
	Tanque de dirección	91 L	24 gal
	306 L	81 gal	

	Convertidor de par / freno / polipasto	40 L	11 gal
	tanque hidráulico	250 L	66 gal
	Convertidor de par / tanque transmisión	95 L	25 gal
<i>Llantas</i>	Llantas estándares		27.00-R49 (E4)
<i>ROPS (Estructura protectora antivuelco) / FOPS (estructuras de protección contra caída de objetos)</i>	ROPS/FOPS Standards		SAE J1040 MAY94 e ISO 3471: 1997. Nivel II ROPS
<i>Sonidos</i>	Sonidos estándares		ANSI/SAE J1166 MAY90, SAE J88 JUN96

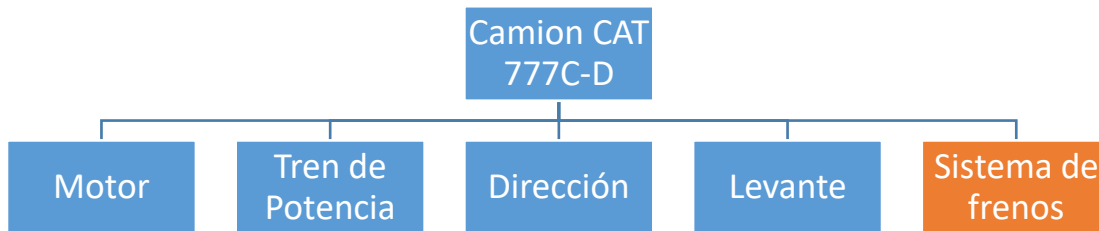


Figura 17. Sistemas principales que componen un camión 777C-D.

El sistema de frenos de estos camiones es accionado y controlado neumáticamente y su actuación es totalmente hidráulica. A continuación, en las figuras 18 a la 25 se mostrará la taxonomía completa del sistema de frenos para todas las series (AGC, 4XJ, 5ER y 3PR). En general el sistema de frenos está compuesto de tres subsistemas, el primero de ellos es conocido como subsistema de carga de aire, el cual se encarga de suministrar aire a una presión constante a todo el sistema neumático de frenos. El segundo subsistema, conocido como sistema de frenos principales, es el encargado de gobernar todos los frenos principales de operación del equipo (frenos de servicio, retardo manual y retardo automático ARC). Por último, se tiene el subsistema de frenos secundarios y liberación de freno de parqueo; este es el encargado de gobernar los frenos de emergencia del equipo y el freno de parqueo.

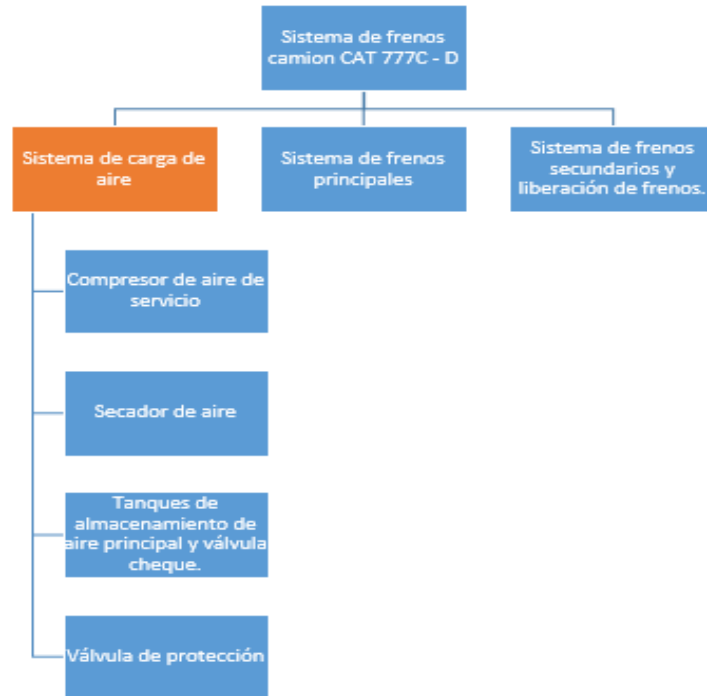


Figura 18. Taxonomía del subsistema de carga de aire. Sistema de frenos de camiones CAT 777C y 777D, series 4XJ, AGC, 3PR y 5ER.

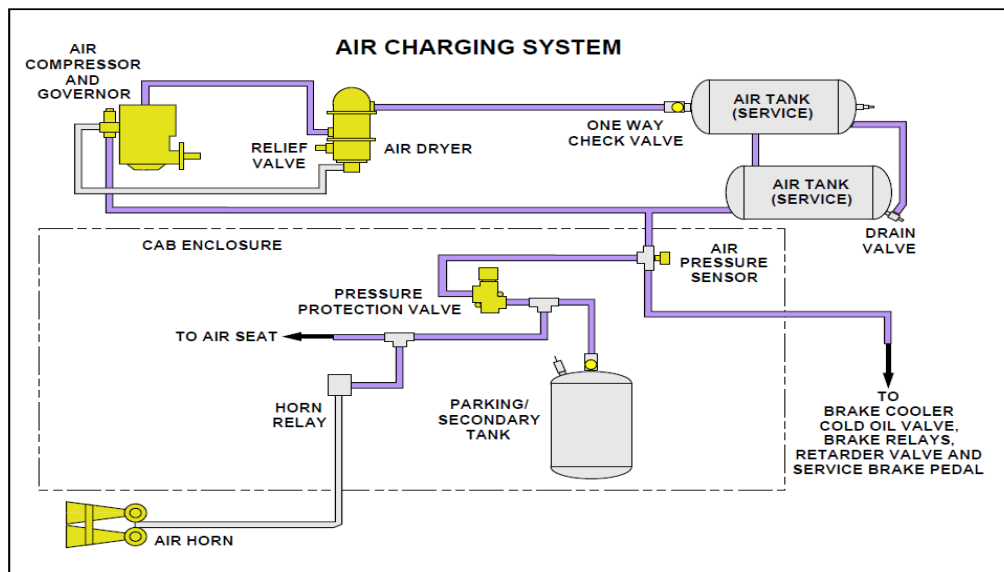


Figura 19. Esquema de carga de aire para el sistema de frenos de camiones CAT 777C – 777D series 4XJ, AGC, 5ER y 3PR. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR.

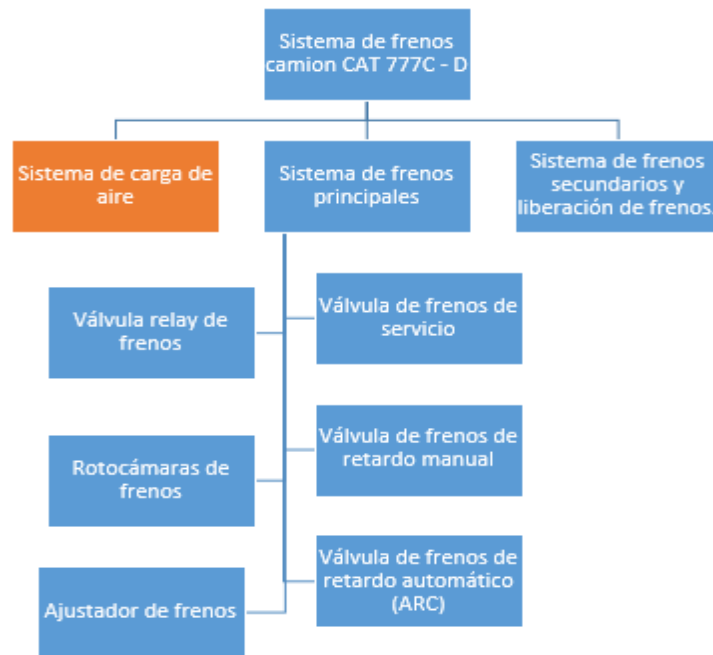


Figura 20. Taxonomía de subsistema de frenos de servicio, sistema de frenos de camiones CAT 777C – 777D, series 4XJ, AGC, 5ER y 3PR.

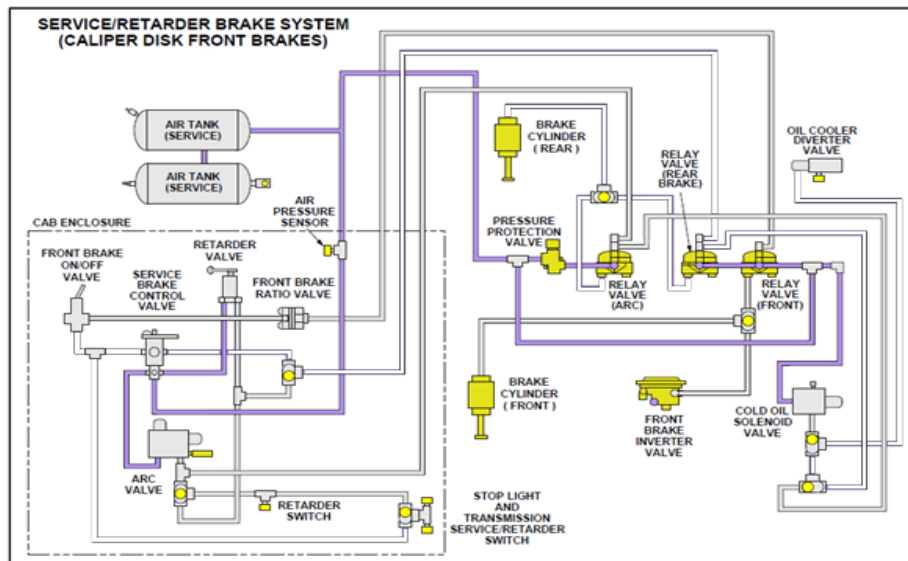


Figura 21. Esquema neumático descriptivo del subsistema de frenos principales para camiones CAT 777C – 777D, series 4XJ, AGC, 5ER y 3PR. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR.

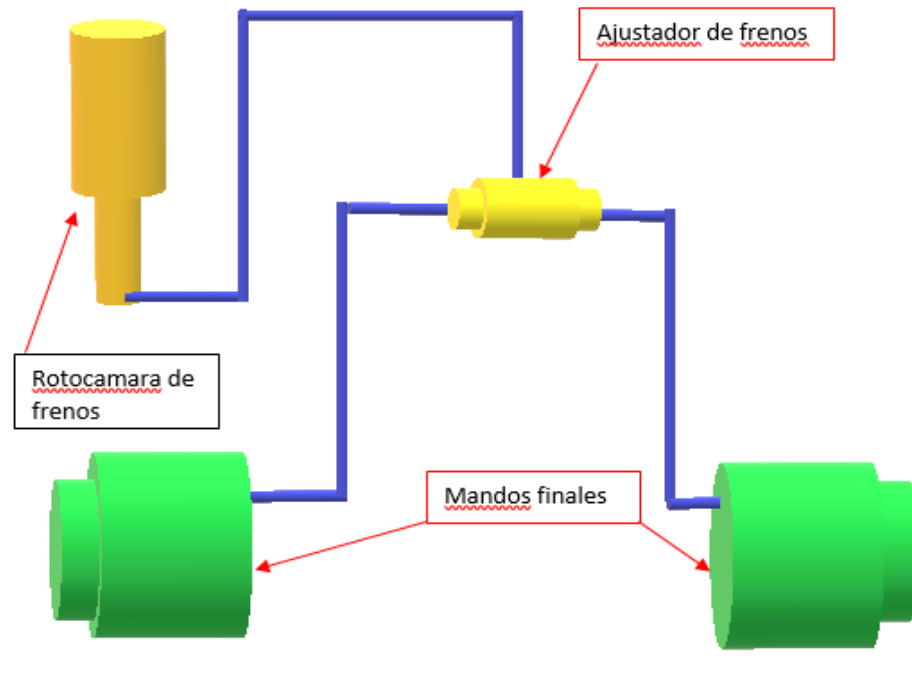


Figura 22. Esquema hidráulico descriptivo del subsistema de frenos principales para camiones CAT 77C – 777D, series 4XJ, AGC, 5ER y 3PR.

En el sistema de frenos principales, el freno más usado es el de retardador manual. Por configuración de la máquina y diseño Caterpillar el retardador automático trabaja a una menor presión neumática (80 psi) que el freno principal (120 psi), esto permite que al usar este freno la fricción en discos del paquete de frenos en los mandos finales no sea tanta y el aceite hidráulico de enfriamiento no aumente tanto su temperatura.

El manual de operación CAT exige que cuando el camión vaya a una velocidad igual o superior a 8 Km/h se use siempre el freno de retardo manual, esto con el fin de mantener la integridad de la máquina. En los casos que la velocidad sea inferior a 8 Km/h se puede usar el freno de servicio.

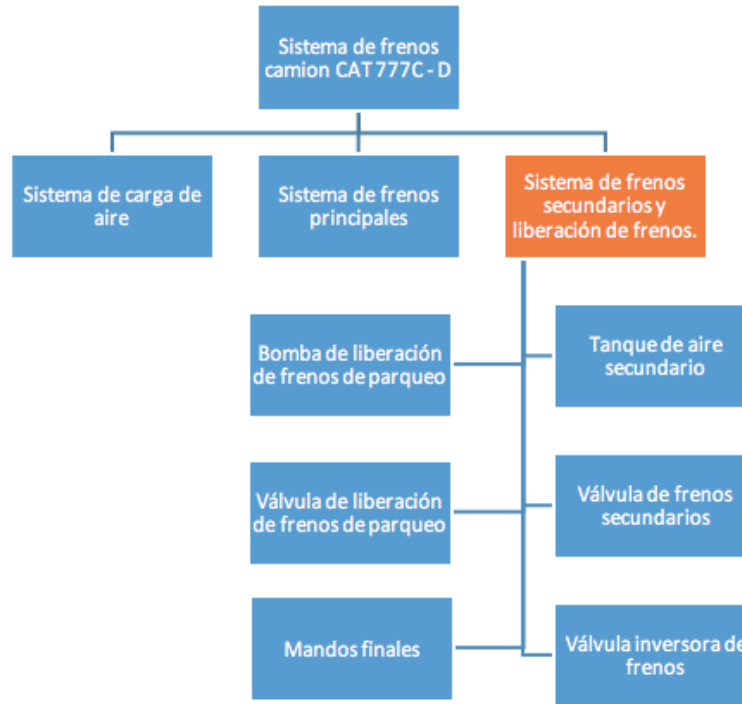


Figura 23. Taxonomía de subsistema de frenos secundarios y de liberación de parqueo, sistema de frenos de camiones CAT 777C – 777D, series 4XJ, AGC, 5ER y 3PR.

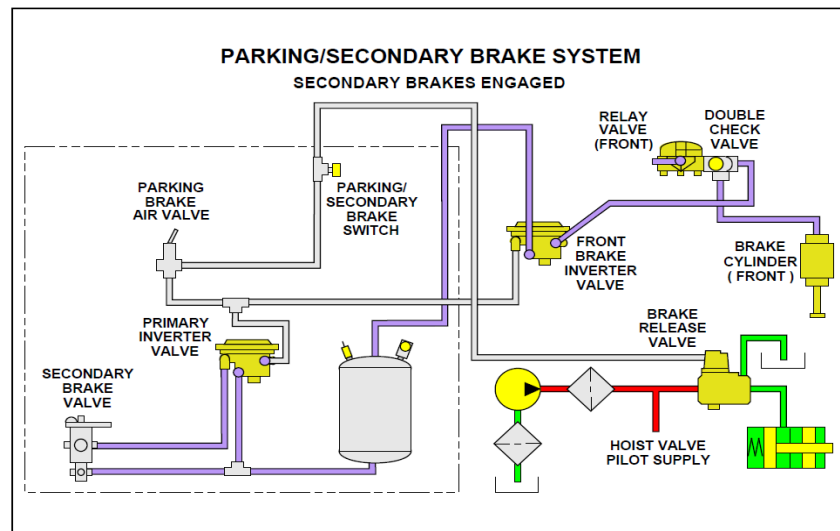
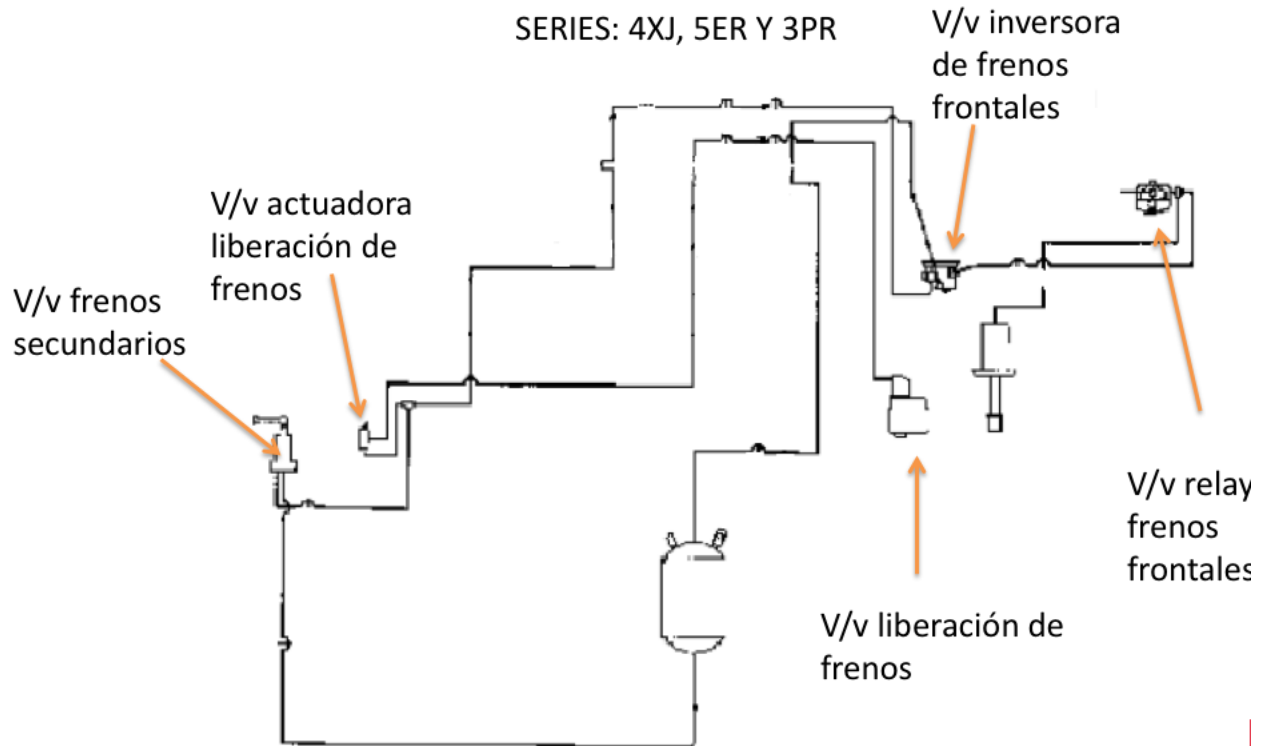


Figura 24. Esquema descriptivo del subsistema de frenos secundarios y de liberación de parqueo para camiones CAT 777C – 777D, series AGC. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR.



*Figura 25.* Esquema descriptivo del subsistema de frenos secundarios y de liberación de parqueo para camiones CAT 777C – 777D, series 4XJ, 3PR y 5ER.

Como se puede observar en las figuras 24, para los equipos de serie AGC, la válvula de activación de frenos secundarios es de pedal y en las series 4XJ, 3PR y 5ER esta válvula es de activación manual (ver figura 25). Básicamente, en esto radica la diferencia entre los dos esquemas.

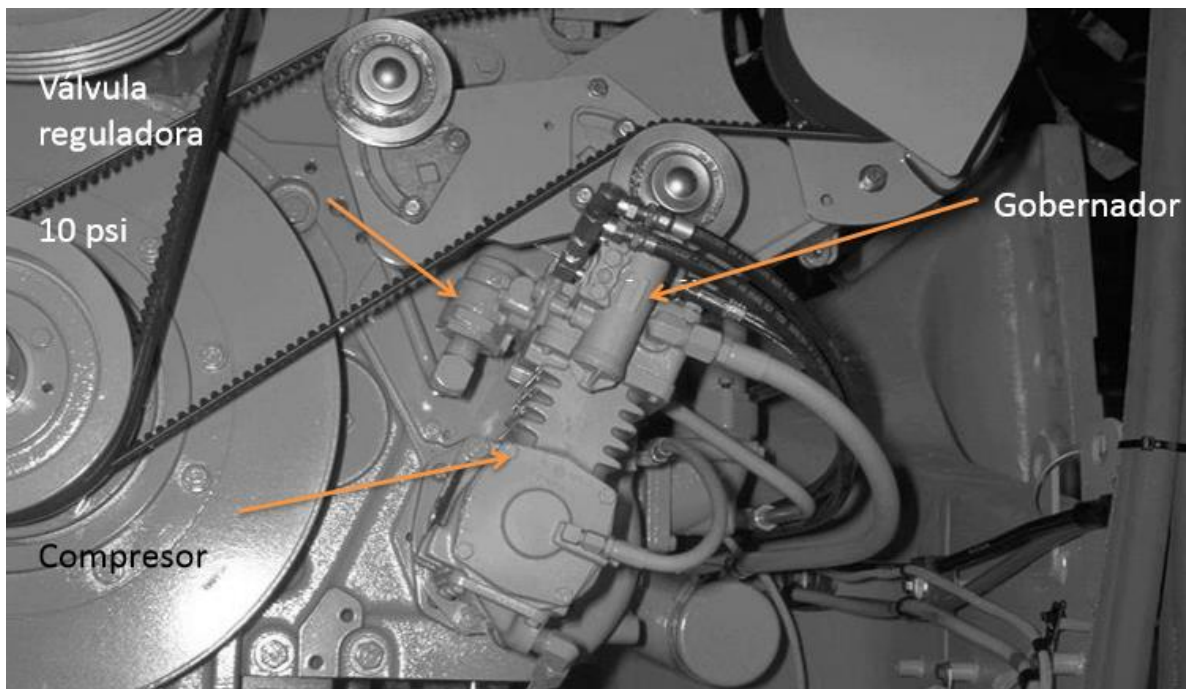
### 6.3.Descripción del sistema de frenos

Como se mencionó anteriormente, el sistema de frenos de los camiones CAT 777C y 777D es gobernado por señales neumáticas y es actuado hidráulicamente. A continuación, se describirán cada uno de los elementos especificados en la taxonomía de los subsistemas.

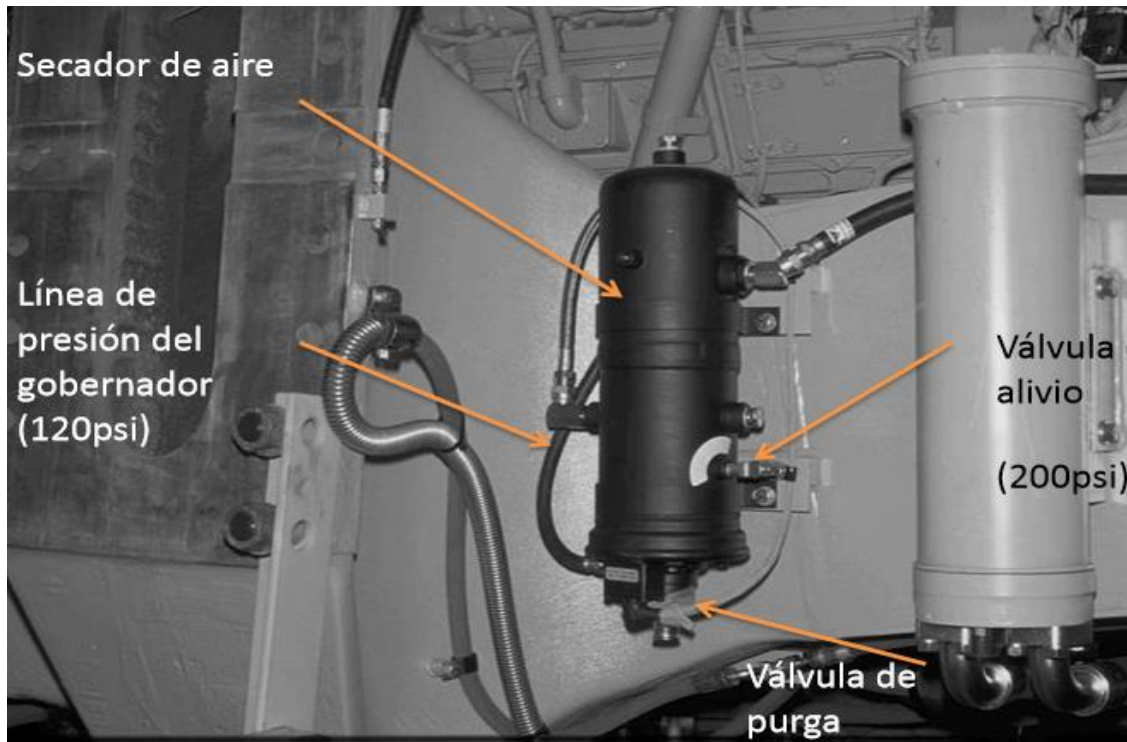
**6.3.1 Compresor de aire de servicio.** El sistema de aire es cargado por el compresor de aire que se encuentra ubicado en frente de motor. La presión del sistema es controlada por el gobernador, el cual, mantiene la presión del sistema entre 660 y 830 kPa (95 y 120psi). La

configuración del gobernador se puede ajustar a través de un tornillo ubicado debajo de la cubierta del gobernador; girando el tornillo hacia OUT se incrementa la presión y girando hacia IN para disminuir la presión.

El suministro de aire fluye desde la carcasa del postenfriador hacia el compresor de aire a través del regulador de presión. Este último limita el aumento de entrega de presión a 70 kPa (10psi). Con esto se logra reducir la presión de entrega al compresor de aire, reduciendo la presión máxima del cilindro que puede ser generado en el compresor de aire. Lo anterior es muy beneficioso para el compresor, ya que, reduce la presión del cilindro disminuyendo la temperatura del compresor de aire y por ende aumenta la vida del mismo.



*Figura 26.* Compresor de aire de servicio de un camión CAT 777C – 777D. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR.



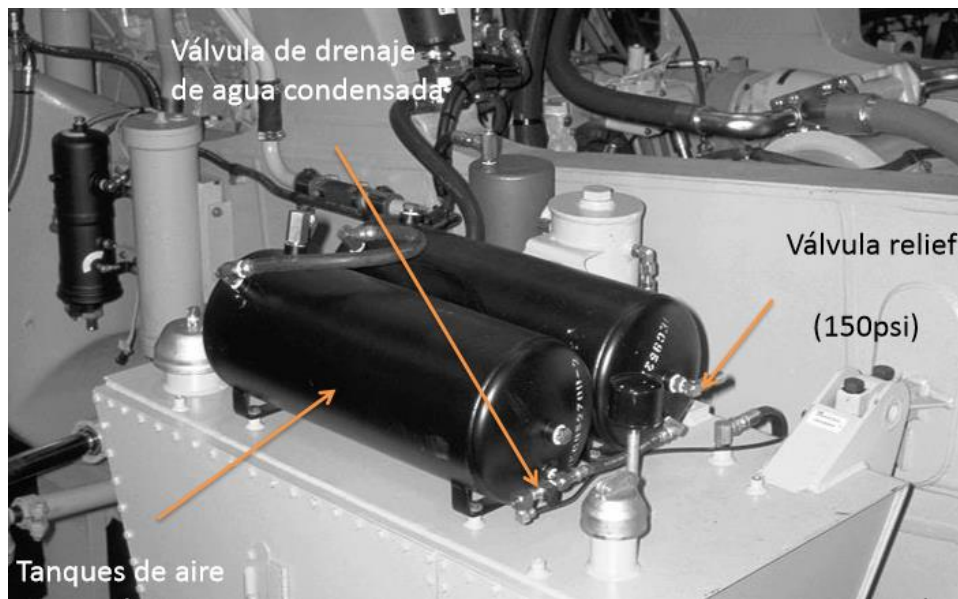
*Figura 27.* Secador de aire de un camión CAT 777C – 777D. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR.

**6.3.2 Secador de aire.** El aire fluye desde el compresor de aire al secador de aire. Este último está ubicado detrás de la llanta frontal izquierda. La función del secador de aire es eliminar los contaminantes y la humedad del sistema de aire. La condición del desecante en el secador de aire debe ser revisado cada 500 horas y cambiado periódicamente, según la humedad del clima local.

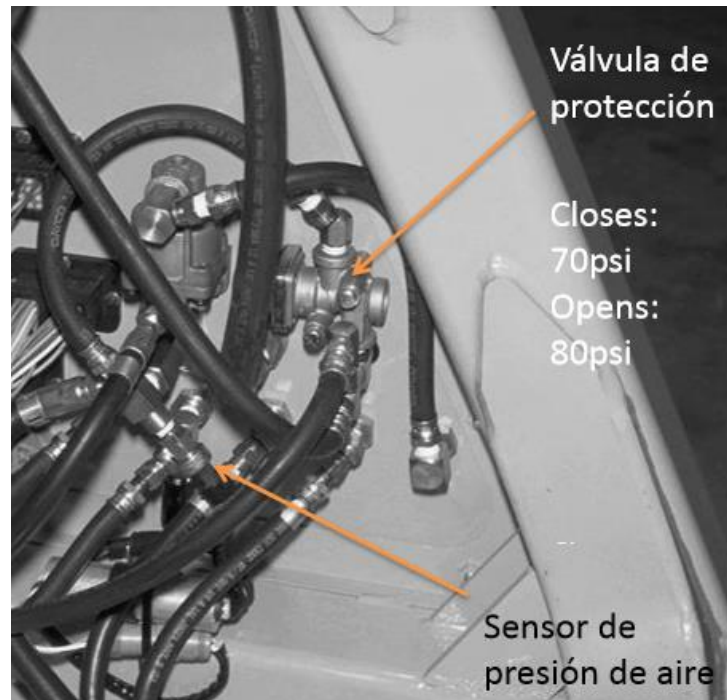
**6.3.3 Tanque de almacenamiento de aire principal y válvula cheque.** El tanque de almacenamiento es un recipiente encargado de almacenar un volumen determinado de aire a una presión dada (120 psi) por el gobernador ubicado en el compresor. Está ubicado en la parte izquierda del camión sobre el tanque de aceite hidráulico. Para poder mantener el aire a presión de 120 psi, el tanque cuenta con una válvula cheque en la entrada que permite que el flujo de aire entre al tanque y no se devuelva. El tanque también cuenta con una válvula de drenaje que permite

drenar el agua que se va condensando en el aire almacenado. La labor de drenar el agua condensada debe realizarla el operador cada vez que va a iniciar el camión.

**6.3.4 Válvula de protección.** La válvula de protección de presión está ubicada detrás de la estación del operador. El suministro de aire fluye desde el servicio y los tanques de freno del retardador, a través, de la válvula de protección de presión al sistema de aire secundario y accesorios. La válvula de protección de presión se abre a 550 kPa (80 psi) y se cierra a 482 kPa (70 psi). Si las líneas de aire secundarias o un circuito accesorio falla, la válvula de protección de presión mantiene un mínimo de 482 kPa (70 psi) en el servicio y el circuito de freno del retardador.



*Figura 28.* Tanques de almacenamiento de aire de un camión CAT 777C – 777D. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR.



*Figura 29.* Válvula de protección del sistema neumático y sensor de presión. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR.

**6.3.5 Válvula de freno de servicio.** La válvula de freno de servicio es controlada por el pedal de freno en la cabina y suministra aire para la válvula de freno de servicio, la válvula de retardo manual y la válvula de control automático del retardador (ARC) son suministradas desde la parte inferior del puerto de la válvula de freno de servicio. Una vez se activa el pedal de frenos de servicio, el aire fluye hacía la válvula relay de frenos de manera proporcional hasta alcanzar una presión máxima de 120 psi.

**6.3.6 Válvula de freno de retardo manual.** La válvula del retardador manual está controlada por la palanca del retardador en la cabina. Normalmente, la válvula del retardador bloquea el flujo de aire hacia el servicio trasero de la válvula relay de frenos. Cuando se acciona la palanca del retardador, el aire fluye hacia la válvula relay de frenos [máximo 550 kPa (80 psi)]. La palanca del retardador se usa para modular el acoplamiento del freno de servicio trasero,

midiendo la cantidad de aire que fluye a la válvula de relay del freno de servicio trasero. El retardador activa los mismos frenos que el pedal del freno de servicio, pero es más fácil controlar la modulación del freno.

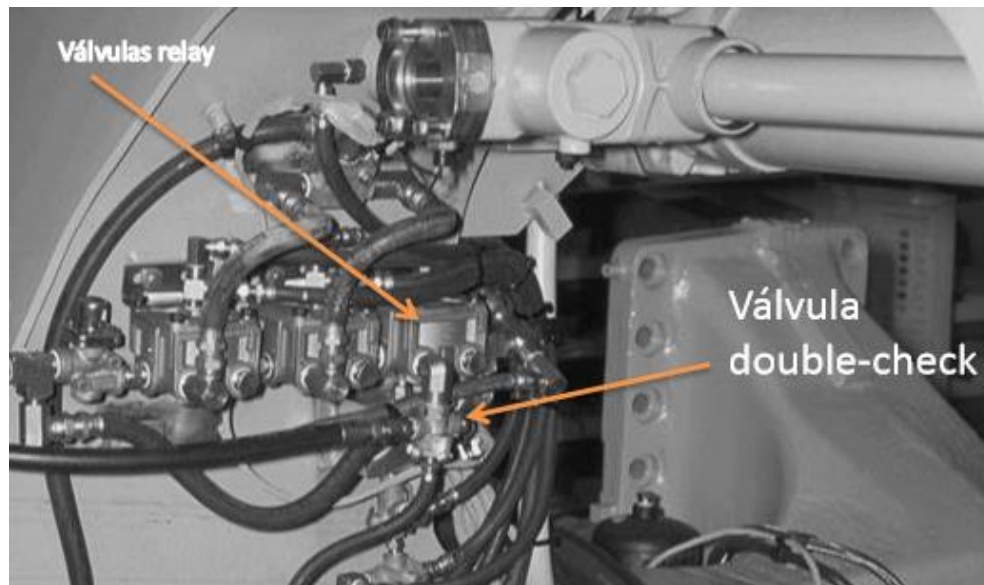


*Figura 30.* Válvula de retardador manual, ubicada en cabina. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR.

**6.3.7 Válvula de retardo automático.** La válvula de retardo automático o ARC no es controlada por el operador; esta válvula es activada por el ECM de frenos cuando el equipo va en pendientes y el motor tiende a sobre revolucionarse debido a la inclinación. La válvula de activación de ARC posee dos solenoides proporcionales que reciben señal de activación cuando se cumplen las condiciones de activación.

**6.3.8 Válvula relay de frenos.** En el sistema de frenos hay 3 válvula de relay de frenos que reciben aire medido de la válvula de frenos principales, de la válvula de retardo manual y de la válvula de retardo automático (ARC); cada válvula de activación posee una válvula relay que recibe la señal. Cuando el sistema de frenos es ENGANCHADO, la válvula de relay se abre y fluye el aire medido desde el tanque de freno de servicio, a través, de la válvula de protección de

presión y la relay correspondiente hacia la cámara trasera al cilindro del freno (rotocámara). Las válvulas están ubicadas en la parte interna del riel RH del chasis, figura 31.



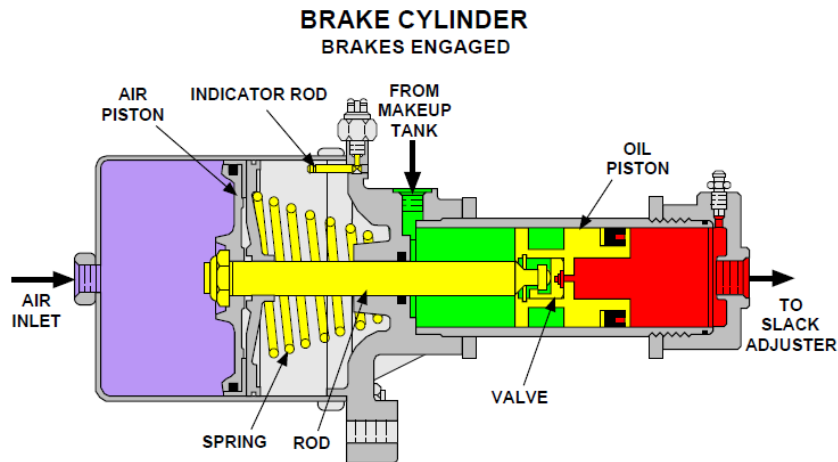
*Figura 31.* Válvulas relay de frenos para los frenos de servicio, retardo manual y retardo automático. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR.

**6.3.9 Roto-cámara de frenos.** Los cilindros de freno o roto-cámaras funcionan con aire sobre aceite. Cuando el aire medido entra en el roto-cámara, un pistón se mueve hacia abajo y presuriza el aceite en la parte inferior de los cilindros. La roto-cámara delantera está ubicado en el tanque hidráulico y suministra aceite a los frenos delanteros. En los camiones con los frenos de disco de pinza estándar, el aceite de presión de la roto-cámara delantera fluye directamente a las pinzas de freno delantero. En los camiones con los frenos delanteros enfriados por aceite del accesorio, el aceite de presión de la roto-cámara delantera fluye hacia el ajustador de holgura del freno delantero.

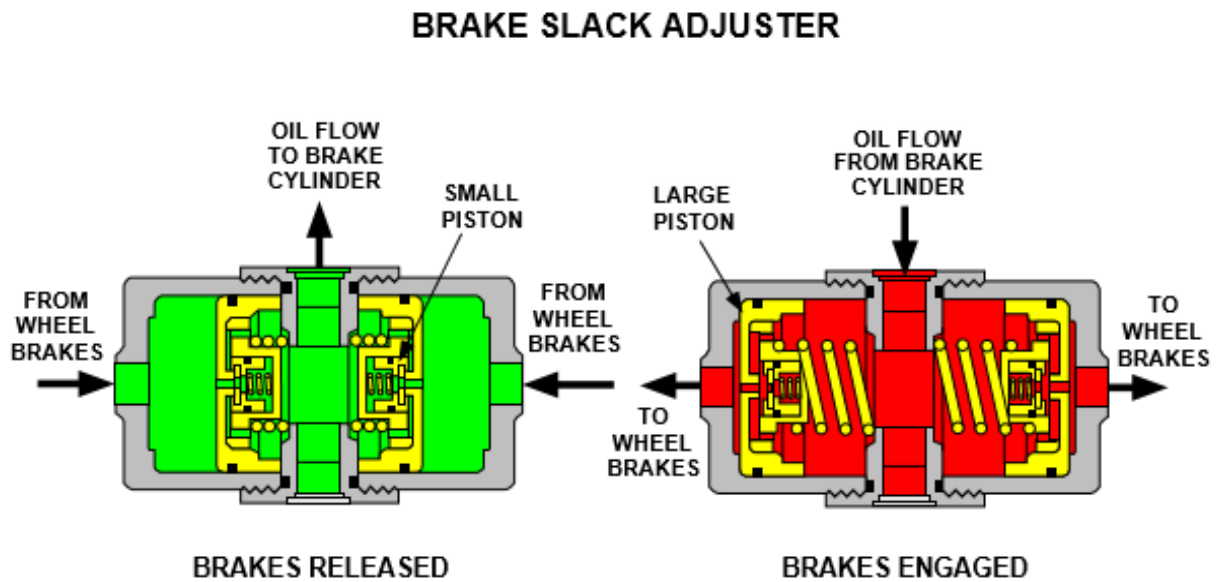
Para el caso de la roto-cámara trasera, esta suministra aceite a los frenos traseros. La presión el aceite del cilindro del freno trasero fluye al ajustador de holgura trasero. La figura 32, muestra una vista seccional de la roto-cámara ENGANCHADA, donde la presión de aire de la válvula del relé

de freno ingresa a la entrada de aire. La presión de aire mueve el pistón de aire y la varilla unida cierra la válvula en el pistón de aceite. Cuando la válvula en el pistón de aceite está cerrada, el pistón de aceite presuriza el aceite en el cilindro. El aceite a presión fluye hacia los ajustadores de tensión trasera y delantera o las pinzas de freno delanteras.

**6.3.10 Ajustador de frenos.** El ajustador de frenos compensa el desgaste en los discos de frenos mediante el paso de pequeños volúmenes remanentes entre el mismo ajustador y los pistones de frenos que están bajo presión. El ajustador siempre mantiene una leve presión en el pistón de frenos.



*Figura 32.* Vista seccional de la roto-cámara ENGANCHADA. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR.



*Figura 33. Vista seccionada del ajustador de frenos en posición de liberación y en posición de enganchado. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR.*

**6.3.11 Tanque de aire secundario.** El tanque de aire secundario, al igual que el principal, se encarga de mantener un volumen fijo de aire a una presión de 120 psi que es otorgada por el gobernador ubicado en el compresor. El aire viene del tanque principal, pasa por la válvula de protección y luego entra al tanque secundario pasando a través de una válvula cheque (ver figura 19). El aire se aloja en el tanque y se mantiene gracias a la función de la válvula cheque. Este tanque suministra aire a todo el sistema de frenos secundarios y de liberación de freno de parqueo.

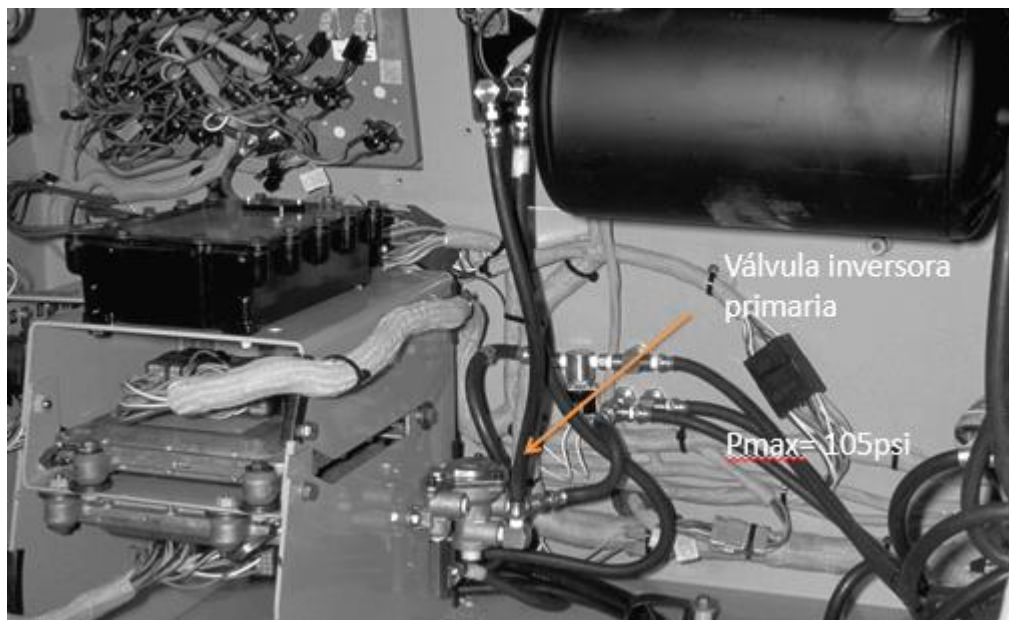
**6.3.12 Válvula de frenos secundarios.** La válvula de freno secundaria controla el flujo de aire a:

- Válvula de aire de freno de parqueo
- Interruptor secundario de freno de parqueo
- Válvula de alivio de freno de parqueo

- Válvula inversora del freno de parqueo

El suministro de aire desde el parqueo y el tanque de freno secundario están presente en el paso de suministro de la válvula de freno secundaria, la válvula inversora primaria y la válvula inversora del freno delantero.

**6.3.13 Válvula inversora de frenos.** Cuando se pisa el pedal de freno secundario, el aire fluye al puerto de señal de la válvula inversora primaria. La válvula inversora primaria bloquea el flujo de aire a la válvula de aire del freno de parqueo, el interruptor de estacionamiento y freno secundario, la válvula de liberación del freno de estacionamiento y el puerto de señal de la válvula del inversor del freno delantero.



*Figura 34.* Ubicación de válvula inversora de frenos en parte trasera de la cabina. 777D update (AGC) off-highway truck, meeting guide 721. CATERPILLAR.

**6.3.14 Válvula de liberación de freno de parqueo.** La válvula de liberación de frenos de parqueo es el elemento más importante del sistema de liberación como tal. Esta válvula posee una alimentación de aceite proveniente de la bomba de liberación de frenos y una alimentación de aire

proveniente de la válvula inversora de frenos ubicada en la parte trasera de la cabina. El aire a 120 psi sirve como señal, que mueve un spool en el interior de la válvula y permite el paso de aceite hacía los paquetes de frenos de los mandos finales. La válvula de liberación de frenos posee una válvula de alivio a enfriamiento que se encarga de mantener la presión hidráulica a una constante de 700 psi.

**6.3.15 Mandos finales.** Los mandos finales son la etapa final de todo el tren de potencia de los camiones, son los que reciben todo la energía y potencia producida por el motor. Están equipados con un sistema de frenos enfriado por aceite. Los frenos están ambientalmente sellados y libres de ajustes, dentro de su espacio hay aceite fluyendo constantemente a través de los discos cumpliendo la función de enfriamiento.

El sistema de frenos de los mandos finales está compuesto de dos partes, una primera parte que cumple la función de los frenos de servicio y otra segunda parte que cumple la función de los frenos de emergencia y liberación de parqueo. Los frenos de servicio, normalmente están liberados por acción de unos resortes y cuando se aplican los frenos se permite la entrada de presión hidráulica que enganchan los discos con los platos. Los frenos de emergencia y liberación de frenos, normalmente están liberados por la acción de la presión hidráulica que llega constantemente al mando final, y se liberan cuando esta presión es cortada y entran en acción un juego de resortes.

#### **6.4. Características técnicas y contexto operacional del sistema de frenos**

La maquinaria amarilla, como se le conoce a todos los equipos de la empresa CATERPILLAR, poseen una gran ventaja respecto a la información que se obtiene de ellas en sus manuales de

mantenimiento y servicio. La empresa Drummond Ltd tiene un gran banco de manuales con información de los camiones CAT 777C y 777D, que junto con la experiencia de los técnicos y supervisores de mantenimiento permiten detallar y contextualizar el sistema objeto de estudio. Las tablas 4, 5 y 6 muestran detalladamente las características y el contexto de operación para las partes más representativas del sistema de frenos de los camiones CAT 777C y 777D teniendo en cuenta que son equipos que laboran las 24 horas del día, viendo afectada su operación solo por condiciones ambientales (lluvia) que se dan en determinadas épocas del año.

Tabla 4.

*Características técnicas y contexto operacional de las partes del subsistema de carga de aire.*

<b>Subsistema de frenos</b>	<b>Elemento</b>	<b>Características técnicas</b>	<b>Condiciones operacionales</b>
Sistema de carga de aire.	Compresor de aire de servicio	Recibe aire a 10 psi Entrega aire entre 95 – 100 psi Posee una válvula reguladora para la entrada de aire. Posee un gobernador para controlar la entrega de aire. Material: Aluminio.	El compresor es movido por un sistema de engranajes adherido al motor. Es lubricado por el mismo aceite del motor. Es enfriado por el refrigerante del sistema de enfriamiento del motor.
	Secador de aire de servicio.	Material: Acero Recibe aire a (95 – 100 psi) Entrega aire a (95 -100 psi) Tiene válvula de alivio a 200psi Posee sílica para secado del aire Tiene válvula de purga de humedad.	Recibe aire a presión y su función es retirar la humedad del aire a través de la sílica para secado. Entrega aire seco a la misma presión de entrada y expulsa el agua.
	Tanques de almacenamiento de aire de servicio	Material: Acero al carbono Presión de trabajo: 120psi Posee válvula de alivio a 150psi Posee válvula de drenaje de humedad. Posee válvula check para mantener el aire almacenado.	Recibe aire seco a la presión otorgada por el gobernador de aire. Lo almacena y retiene a través de una válvula check para ser distribuido a todos los elementos del sistema neumático de frenos.
	Válvula de protección	Material: aluminio Válvula de 2 entradas con dos posiciones. Abre a 80psi Cierra a 70 psi	Válvula que permite el paso de aire hacía el sistema secundario de frenos cuando la presión es superior a 80psi y se cierra si la presión disminuye de 70 psi.

Tabla 5.

*Características técnicas y contexto operacional de las partes del subsistema de frenos principales.*

<b>Subsistema de frenos</b>	<b>Elemento</b>	<b>Características técnicas</b>	<b>Condiciones operacionales</b>
<i>Sistema de frenos principales</i>	Válvula de freno de servicio	Válvula neumática. Material: Aluminio Presión de entrada: 120psi Presión de entrega: 120psi Válvula proporcional de actuación mecánica.	Esta válvula controla los frenos principales del equipo. Recibe aire seco a presión de 120 psi y regula su entrega dependiendo la actuación mecánica (pedal) proporcionada hasta un límite de 120psi. Envía el aire directamente a la válvula relay de frenos de servicio.
	Válvula de frenos de retardo manual.	Material: aluminio Válvula neumática Válvula proporcional actuada manualmente. Recibe aire seco a 120 psi. Entrega aire a 80psi. Válvula regulable de presión.	Válvula que controla los frenos de retardo manual del equipo. Recibe aire a presión de 120psi y entrega aire proporcionalmente a la actuación manual otorgada hasta un máximo de 80 psi. Esta válvula es la más usada por los operadores, es el freno más usado. Envía el aire directamente a la válvula relay de frenos de servicio.
	Válvula de frenos de retardo automático	Material: aluminio Válvula electro – neumática. Recibe aire a 120psi Entrega aire a 120psi	Esta válvula posee solenoides que son activados por el ECM de frenos del equipo. Dependiendo de determinados requisitos se activa gradualmente alcanzando una presión máxima de 120 psi. Envía el aire directamente a la válvula relay de ARC.
	Válvula relay de frenos	Material: Aluminio Válvula de actuación neumática Recibe aire a 120 psi Entrega aire a 120 psi	Esta válvula trabaja siempre que se activan los frenos. Recibe señal de activación de la válvula de frenos de servicio ó de la válvula de frenos de retardo manual y envía aire a presión de 120 psi hacia la rota cámara de frenos.
	Roto cámaras de frenos	Material: Fundición nodular Actuación neumática Entrega hidráulica Presión de entrada: 120 psi Entrega una relación de 1:6.6 en presión hidráulica.	La rota cámara de frenos tiene una alimentación neumática y una hidráulica. A través de una relación de Pascal, multiplica cada 1 psi de aire en 6.6 psi de aceite. Este aceite es enviado hacia el ajustador de frenos.

Ajustador de frenos	Material: Acero	El ajustador recibe presión hidráulica del roto cámara de frenos y lo distribuye equitativamente hacia ambos mandos finales del equipo. Su principal función es contrarrestar los desgaste en los discos de frenos para que ambos mandos frenen de la misma manera.
---------------------	-----------------	---

Tabla 6.

*Características técnicas y contexto operacional de las partes del subsistema de frenos secundarios y de liberación de parqueo.*

Subsistema de frenos	Elemento	Características técnicas	Condiciones operacionales
<i>Sistema de frenos secundarios y liberación de parqueo.</i>	Tanque de almacenamiento de aire secundario	Material: Acero al carbono Presión de trabajo: 120psi Posee válvula de alivio a 150psi Posee válvula de drenaje de humedad. Posee válvula check para mantener el aire almacenado.	Recibe aire seco a presión de 120 psi que viene de la válvula de protección de aire principal. Lo almacena y retiene a través de una válvula check para ser distribuido a todos los elementos del sistema secundario de frenos y de liberación de parqueo.
	Válvula de frenos secundarios o emergencia.	Material: aluminio Válvula neumática Válvula proporcional actuada manualmente en series 4XJ, 5ER y 3PR Válvula proporcional actuada mecánicamente (pedal) en series AGC. Recibe aire seco a 120 psi. Entrega aire a 120psi.	Válvula que controla los frenos secundarios o de emergencia. Estos frenos son usados cuando el sistema principal no funciona. Esta válvula recibe aire a 120 psi que proviene del tanque principal y lo envía proporcionalmente hacia la válvula inversora de frenos frontales y hacia la válvula de liberación de frenos. Entrega 120 psi.
	Válvula inversora de frenos	Material: Aluminio Válvula de actuación neumática Recibe aire a 120 psi Entrega aire a 120 psi	Esta válvula siempre permite el paso de aire hacia la válvula de liberación de frenos y cuando recibe señal esta corta el flujo. Su funcionamiento es inverso a una válvula relay. Recibe 120 psi y entrega un máximo de 100 psi.
	Válvula de liberación de frenos de parqueo	Material: Fundición nodular Válvula hidráulica accionada neumáticamente. Recibe aceite hidráulico a 700 psi Recibe señal neumática (100-120psi) Entrega aceite a 680 psi La presión de entrega se puede calibrar.	Esta válvula recibe aceite a presión (700 psi) directamente de la bomba de liberación de frenos. Recibe señal neumática de activación (100-120psi) directamente de la válvula inversora de frenos y permite el paso del aceite hacia los mandos finales del equipo. La

---

Bomba de liberación de freno de parqueo	Material: Acero al carbono Bomba de piñones Trabaja siempre que el equipo este encendido Caudal de entrega: 35-50 gpm	presión de entrega de trabajo es de 680psi.  Es una bomba de piñones acoplada al convertidor de torque del equipo. Esta mantiene un flujo constante de aceite hacía la válvula de liberación de frenos. En la válvula de liberación se regula la presión del sistema a través de una válvula de alivio. La presión del sistema es de 700 psi.
Mandos finales	Posee un sistema planetario para transmitir el movimiento del equipo Posee un sistema de discos y platos para el frenado. Posee un sistema de enfriamiento con aceite. Recibe presión hidráulica para frenado a 680 psi. Recibe presión de enfriamiento a 25 psi.	Los mandos finales están equipados con un sistema de platos y discos que reciben una presión hidráulica (680psi) que hace que se unan y a la vez frenan el equipo. Adicionalmente recibe un caudal de aceite de enfriamiento a una presión de 25 psi que mantiene la temperatura del componente.

---

### 6.5. Funciones del sistema y desarrollo del AMFE

Habiendo expuesto y caracterizado las partes de estudio dentro de las fronteras definidas anteriormente en el análisis de la literatura recopilada y el desarrollo metodológico del RCM, podemos dar inicio al desarrollo del diagrama de flujo de la figura 14 que corresponde de igual manera a las 7 preguntas que hay que dar respuesta para implementar la metodología de RCM en cualquier proceso. Con lo anterior podemos dar respuestas a las fases 1 y 2 del diagrama de flujo, donde seleccionamos el sistema y recolectamos información y definimos las fronteras del sistema a analizar.

En las fases 3 y 4, describimos el sistema teniendo en cuenta las descripciones funcionales, características técnicas del elemento, condiciones operacionales, condiciones ambientales, entre otros, estableciendo un orden jerárquico de las funciones del sistema a través de un diagrama de bloque funcional donde establecemos las interfaces de entradas y salidas, para así, establecer una

estructura desagregada de trabajo en el sistema para cada una de las funciones de los subsistemas que componen el diagrama.

Con toda la información reunida en las 2 fases anteriores se reúne lo necesario para cumplir con el primer principio de RCM, “preservar las funciones del sistema”. Donde es muy importante tener en cuenta que se analizan las fallas funcionales, más no las fallas en los equipos. En el apéndice A (matriz de definición de funciones, fallas funcionales y modos de falla) se puede observar el desarrollo de las fases 3 y 4 descritas anteriormente, con base en el histórico de 4 años de reparación de los equipos en Drummond Ltd, los cuales, reposan en el módulo de mantenimiento PeopleSoft, las guías caza-fallas emitidas por los fabricantes, el programa de mantenimiento actual y la experticia del grupo de trabajo donde identificamos otros modos de falla.

En la fase 5 (como lo indica su nombre), aplicamos y desarrollamos el análisis de modos y efectos de falla (AMFE) con el objetivo de definir y priorizar los modos de falla de los componentes (como falla el componente para generar una falla funcional) y su respectivo análisis de causa raíz (razón básica). Para lo anterior, partimos de las funciones codificadas definidas de las fases 3 y 4 y subcodificamos las fallas funcionales describiendo su falla funcional. Para luego establecer el modo de falla codificando estos, para así, describir sus efectos. Es importante tener en cuenta que estos modos de falla pueden ser de tres niveles: nivel de equipo, nivel de sistema y nivel de planta.

Después del análisis descrito y el cual se puede observar en el apéndice A, podemos destacar un porcentaje bajo del 27% en fallas ocultas, lo cual indica un cubrimiento completo en la metodología del AMFE. Continuando en el desarrollo de la fase 5, acerca de la valoración de los efectos, tenemos en cuenta los riesgos asociados en la operación de Drummond, que son:

- Riesgos ambientales: Consecuencias que tendrá la falla sobre el medio ambiente.

- Riesgos humanos: Consecuencias que tendrá la falla sobre las personas involucradas como el operador y terceros.
- Riesgos económicos: Consecuencias que tendrá la falla en la economía de la empresa, principalmente en los costos de repuestos, mano obra y horas de no producción del camión.
- Riesgo operacional: Consecuencias que tendrá la falla en la imagen corporativa de la empresa.

CONSECUENCIAS				CONSECUENCIA	PROBABILIDAD						
HUMANAS	AMBIENTALES	COSTOS (USD)	Operación		IMPOSIBLE (A)	IMPROBABLE (B)	REMOTO (C)	OCASIONAL (D)	MODERADO (E)	FRECUENTE (F)	
Puede causar la muerte	Efectos ambientales severos e irreversibles con sanciones por las entidades del estado.	>\$30000	> 48 hr	Catastrofico	1	A1	B1	C1	D1	E1	F1
Puede ocasionar lesiones permanentes	Efectos reversibles con planes de acción a corto y mediano plazo.	\$15000 - \$30000	24 hrs - 48 hrs	Critico	2	A2	B2	C2	D2	E2	F2
Puede generar incapacidad temporal	Efectos moderados con planes de acción a corto plazo.	\$7500 - \$15000	12 hrs - 24 hrs	Marginal	3	A3	B3	C3	D3	E3	F3
Puede ocasionar lesiones menores y/o tratamientos médicos.	Efectos leves que pueden ser controlados fácilmente.	\$3000 - \$7500	6 hrs - 12 hrs	Insignificante	4	A4	B4	C4	D4	E4	F4
No compromete la seguridad de las personas.	No afecta el medio ambiente	<\$3000	< 6 hrs	Ninguno	5	A5	B5	C5	D5	E5	F5
						> 8 Años	< 4 Años	< 2 Años	< 1 Años	< 6 Meses	± 1 Mes

Figura 35. Matriz de criticidad de riesgos para valorar consecuencias de las fallas funcionales en el sistema de frenos de camiones CAT 777C – 777D.

Como se observa en el apéndice A, los modos de falla más críticos están enfocados principalmente en riesgos económicos, por los altos costos de los componentes y las horas hombre requeridas, y en riesgos operacionales, por las altas horas máquina necesarias para la reparación; esto se observa en los subsistemas de carga de aire y aplicación de frenos secundarios y liberación de parqueo. Por otra parte, en el subsistema de frenos principales, las fallas funcionales tienen afectaciones directas sobre la seguridad del operador y de las personas que estén en el área de trabajo.

Todas las fallas funcionales encontradas en este análisis tienen la particularidad que si son corregidas inmediatamente son detectadas, sus costos y tiempos de reparación serían muy bajos.

Sin embargo, si son detectadas y los operadores son permisivos decidiendo continuar operando el equipo, los costos y tiempos de reparación se aumentan de manera exponencial, afectando gravemente la salud de la máquina y la seguridad del mismo operador. Estas son las condiciones que fueron asumidas para la valoración a cada uno de los modos de falla.

### **6.6. Selección de tareas de mantenimiento**

Una vez se determinaron las fallas funcionales, los modos de falla y sus efectos en el sistema de frenos, continuamos con las fases 6 y 7 de la figura 14, y para esto, procedemos a contestar las siguientes preguntas: ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir estas fallas? Y ¿Qué se puede hacer si la solución más costo – efectiva no se tiene disponible? Al responderlas podemos determinar que falla funcional requiere intervenciones preventivas, predictivas intervenciones o cambios periódicos para evitarla, rediseño para eliminar o si simplemente se deja correr a falla. En todos los casos, se busca que la actividad que se vaya a realizar minimice el riesgo más crítico asociado al modo de falla establecido y para eso es necesario apoyarse en un árbol lógico de decisión (ver figura 36) que permita contemplar todos los riesgos.



En la figura 37 se puede observar que de las 46 tareas propuestas (ver apéndice B) el tipo de tareas principal es búsqueda de falla que va estrictamente relacionada a inspecciones que determinen fallas funcionales de los elementos del sistema de frenos. El siguiente porcentaje mayor lo tiene el tipo de sustitución cíclica, que va estrictamente enfocado en evitar fallas funcionales a raíz de la finalización de la vida útil de los elementos del sistema de frenos.

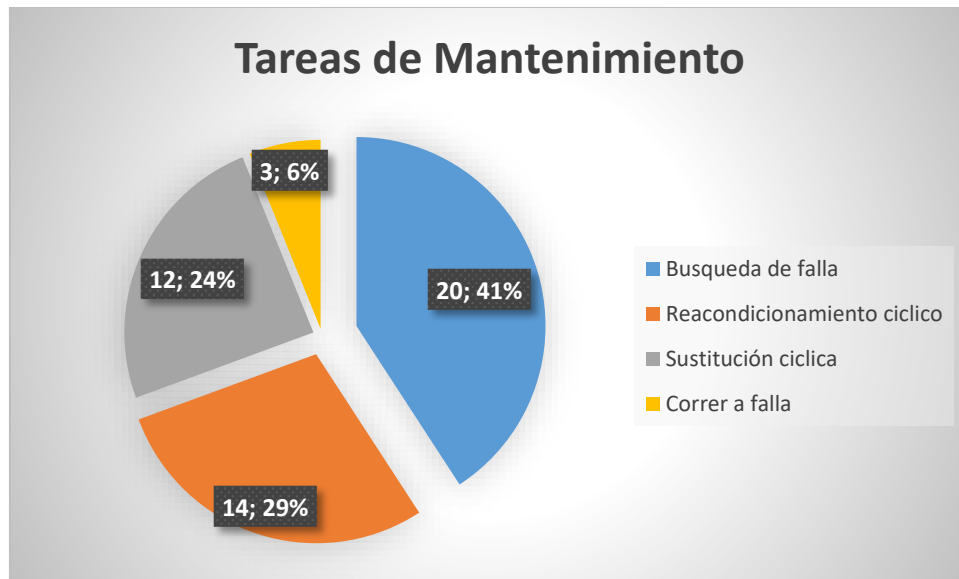
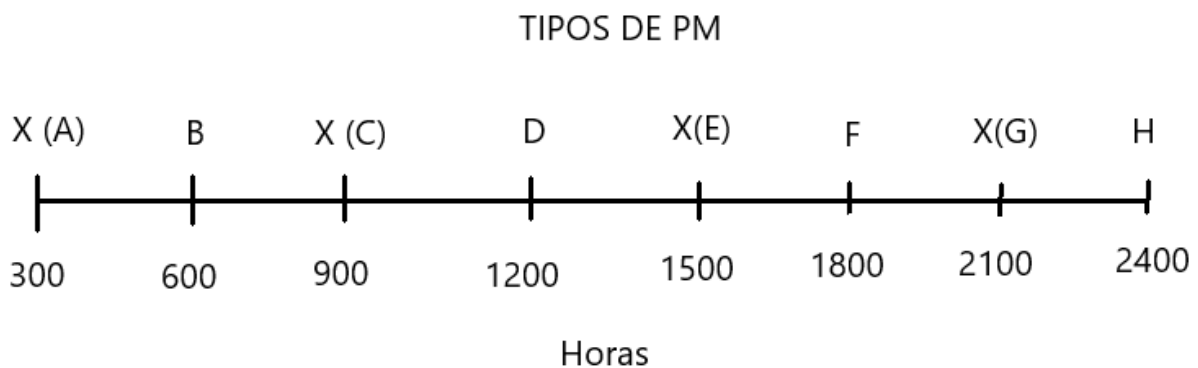


Figura 37. Discriminación porcentual de los tipos de tareas seleccionados para las fallas funcionales del sistema de frenos.

### 6.7. Análisis de modelo de mantenimiento propuesto

Se hace necesario aclarar que en el modelo de mantenimiento propuesto se es consciente del aumento en mano de obra (horas / hombre) y el aumento de consumo de repuestos, que al final impactan los costos de mantenimiento. Pero, como se mencionó desde el principio en el planteamiento del problema, uno de los objetivos de este análisis es la disminución de los equipos contaminados en su sistema hidráulico por fallas en el sistema de frenos, cuya reparación sería por mucho, más costosa. Para poder tener un comparativo más claro entre el plan de mantenimiento actual y el que se propone se tendrá en cuenta el número de horas hombre invertido en cada una de las actividades

**6.7.1 Plan de mantenimiento actual.** El plan de mantenimiento actual para los camiones CAT 777C – 777D en la empresa Drummond Ltd es un programa de mantenimiento preventivo cada 300 hrs, clasificado en 3 tipos diferentes y que se repiten hasta que completan un ciclo de 2400 hrs. Los tipos son: pm X, pm B – F, pm D - H; estos van distribuidos como se muestra en la figura 38.



*Figura 38.* Tipos de pm vs horas de trabajo de la máquina.

Cada tipo de pm posee unas pautas particulares para realizar al sistema de frenos. Estas pautas se pueden apreciar claramente en el apéndice D. En general, el plan actual solo implemente algunas tareas de inspección y de búsqueda de fallas; no se emplea ninguna sustitución cíclica a los elementos del sistema ni reacondicionamientos. Según este plan, los elementos del sistema de frenos solo son cambiados cuando presentan fallas, condición por la cual se han generado muchas contaminaciones en el sistema hidráulico<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> En el apéndice F se puede apreciar cual es el costo total promedio aproximado para reparar un camión CAT 777D cuando se presenta una contaminación hidráulica.

**6.7.2 Actividades de búsqueda de falla.** Dentro de la selección de tareas surgieron muchas actividades (20 en total) por búsqueda de falla o pérdida de funciones, que no son fácilmente detectables. Esto se debe a que los históricos de reparación de los equipos en los últimos 4 años muestran que la mayoría de las fallas funcionales pudieron haber sido detectadas si se realizaran determinadas pruebas a todos los elementos del sistema de frenos. Se encontraron dos problemas principales que generan esta situación; primero, el plan de mantenimiento actual tiene las ventanas de trabajo adecuadas (pm's), pero no se realizan las pruebas necesarias para encontrar las fallas funcionales que no son fácilmente detectables por el operador de los equipos; y segundo, la gran mayoría de los técnicos tienen desconocimiento de las características, contextos de operación y funciones propias del sistema de frenos de los camiones CAT 777C y 777D.

Ante esta situación, se decide abordar la totalidad de las tareas de búsqueda de fallas centrándolas en dos actividades principales:

*Primero*, crear un formato de evaluación para el sistema de frenos de los camiones CAT 777C – 777D, en donde se permita evaluar todas las funciones que ya han sido determinadas anteriormente. Aplicar este formato en cada pm de 600 hrs, es decir, cada pm tipo B, D, F y H. En el apéndice G, se encuentra este formato, el tiempo de ejecución de esta actividad es de 2 horas con dos técnicos mecánicos, para un total de 4 H/H.

*Segundo*, capacitar a todo el personal técnico para mejorar el conocimiento técnico en el sistema de frenos de los camiones CAT 777C – 777D. En el taller de mantenimiento de camiones carboneros y auxiliares se tiene una población de 120 técnicos divididos en tres rotaciones (1, 2 y 3, respectivamente) de 40 técnicos<sup>10</sup>. Para poder abordar a todo el personal se seleccionaron 3

---

<sup>10</sup> En Drummond Ltd, los turnos de trabajo de cada rotación es 7 días laborando X 4 días descansando. En las jornadas de trabajo, se labora de 6am a 6 pm y de 6pm a 6am.

semanas de entrenamiento continuo, en las cuales se entrenaban entre 5 y 6 personas por día. Esto fue un reto grande para la gerencia de mantenimiento debido a que se estaban invirtiendo en promedio 60 H/H por día de trabajo. La metodología del entrenamiento fue la siguiente:

Instructores:

Ingeniero Luis H. Rueda, Supervisor de Mantenimiento Equipo Móvil

Ingeniero Alex A. Alemán, Supervisor de Mantenimiento Equipo Móvil

Material:

Se crea una presentación donde se desglosa detalladamente los tres subsistemas de frenos: carga de aire, sistema de frenos secundarios y de parqueo, y sistema de frenos principales. Adicionalmente se imprimen copias de toda la información y se entregan a cada uno de los participantes.

Metodología aplicada:

- Examen inicial (objetivo conocer como se está en el momento) (1hora)
- Teoría (4 horas)
- Pruebas en banco de válvulas (2 horas)
- Reconocimiento y pruebas en equipo (2 horas)
- Examen final (0,5 horas)

Asistentes:

Por día de entrenamiento asisten 5 personas, combinadas entre ambas minas y de diferentes empresas (DLTD, MASA, KOM, CHM).

Los resultados obtenidos con este entrenamiento fueron satisfactorios, logrando obtener hasta un 40% de aumento en el conocimiento de los técnicos sobre el sistema de frenos de estos equipos<sup>11</sup>. Para dar mayor entendimiento al tema, también se fabrica un banco de prueba de válvulas, ver figura 39. En el apéndice H se encuentra el examen de conocimientos que se crea para evaluar la efectividad del entrenamiento.



*Figura 39.* Sección de entrenamiento con banco de pruebas de válvulas del Sistema de freno de camiones CAT 777C – 777D. Drummond Ltd.

---

<sup>11</sup> Este porcentaje se obtiene de las evaluaciones que se realizan al inicio y al final de los entrenamientos.

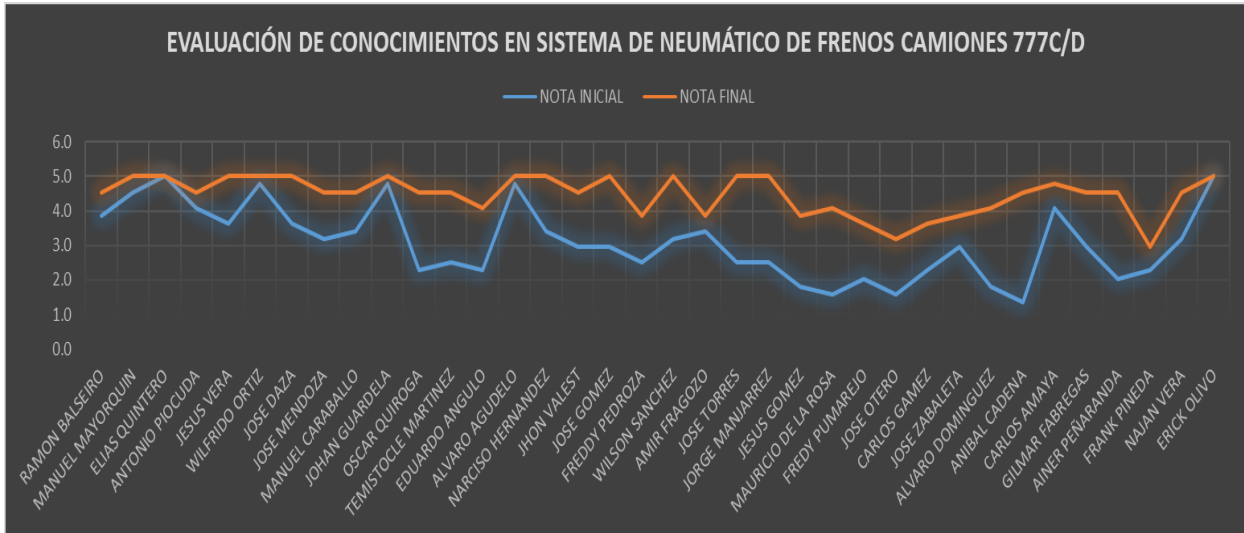


Figura 40. Resultados de la evaluación de conocimientos en sistema de frenos de la primera semana de entrenamientos. Drummond Ltd.

**6.7.3 Actividades de reacondicionamiento cíclico.** Las actividades de reacondicionamiento cíclico que se seleccionaron para las fallas funcionales encontradas van también relacionadas con las pruebas al sistema de frenos que se especifica en el apéndice G y las inspecciones propias de cada mantenimiento preventivo (apéndice D).

Por otra parte, se resalta la importancia del buen enrutamiento y seguimiento a la condición de las líneas tanto hidráulicas como neumáticas. Para esto se ha creado un formato que ayude al personal técnico en las labores de enrutamiento de líneas, ver apéndice I. Este formato es apéndice a los check list de pautas de mantenimiento preventivo y es referenciado como una pauta de estricto cumplimiento. El tiempo invertido en esta labor es de 1 H/H.

**6.7.4 Actividades de sustitución cíclica.** En el análisis y selección de tareas surgieron varias actividades de tipo sustitución cíclica, 12 en total. La mayoría de los elementos del sistema

de frenos que se propone cambiar son elementos de bajo costo, en comparación con el valor del camión en general, pero que tienen efectos muy grandes cuando presentan fallas funcionales. En un principio se plantea la idea de realizar actividades predictivas para evitar la falla de estos elementos, pero las ideas que surgían no resultaron viables en términos de costo – efectividad; en todos los casos resulta más económico el proceso de sustitución cíclica. Como se observa en el apéndice B, a continuación, se muestran los elementos que serían reemplazados cíclicamente:

- Válvula cheque del tanque de aire principal
- Válvula cheque del tanque de aire secundario
- Válvula de liberación de frenos
- Válvula inversora principal
- Válvula de frenos secundarios

Todos los elementos anteriormente mencionados, nunca han tenido registrada una trazabilidad de falla<sup>12</sup>, ya que son elementos pequeños (en tamaño y costo) en relación con todos los componentes del equipo, algunos de ellos, no están siquiera registrados como modos de falla. El único seguimiento que tendrían sería la verificación de funciones que se ha propuesto para cada pm de 600 horas. En conjunto con todo el grupo de trabajo de este RCM, se toma la decisión de que estos elementos se cambien cada vez que se realice un cambio de mando final, que, en promedio, tienen una vida útil de 18000 horas.

---

<sup>12</sup> En el Sistema PeopleSoft se registran todos los cambios de componentes y se podría obtener la información de ellos. A lo que se refiere el texto, es que hasta la fecha, no se realiza ningún seguimiento a estos.

La bomba de liberación de frenos es un elemento más importante para el sistema, hablando en términos económicos y del cual se tiene mucha más información en su historial de falla. Por lo que se decide realizar un análisis de weibull que nos permita establecer en qué fase de su vida útil se presenta la falla funcional.

Para la realización del weibull se toma el historial de falla de la bomba de liberación de frenos de los últimos 3 años de todos los equipos CAT 777C – 777D en los que se ha cambiado. Estos datos se procesan con ayuda del software WEIBULLEIM y se obtiene una gráfica con la tendencia de la vida útil de la bomba y también obtenemos el factor  $\beta$  que nos indica en qué fase se encuentra, ver figuras 41 y 42.

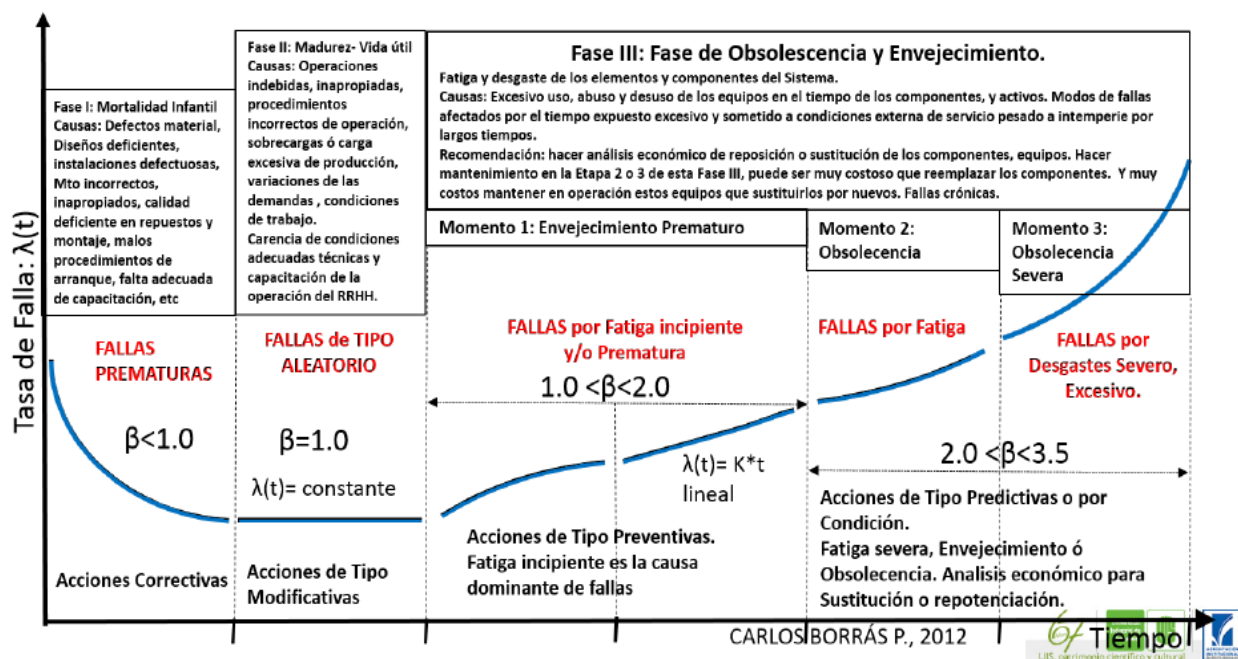


Figura 41. Gráfica de weibull para tasa de fallas en el tiempo. 2017. Carlos Borrás P. Memorias de clase de Mantenimiento preventivo. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. UIS

Como se puede observar en la figura 42, el beta de la distribución es de  $\beta=1.5$ . Si relacionamos esto con la información de la figura 41, tenemos que la bomba de liberación de frenos está presentando fallas por fatiga incipiente y/o prematura que puede estar relacionada con excesivo

uso, abuso operacional, trabajos en intemperie por tiempos prolongados, condiciones adversas de operación, entre otras.

En Drummond Ltd, la condición de operación para la maquinaria amarilla es bastante exigente, los camiones 777C-777D son equipos que trabajan las 24 horas del día en un terreno que presenta mucha polución y presencia de agua por las condiciones ambientales; todos estos factores permiten que cuando se presenta alguna fuga en el sistema hidráulico toda esta contaminación entra al sistema. Este es sólo uno de los ejemplos que muestra las condiciones adversas de operación a las que está sometida la bomba y que ocasiona un envejecimiento prematuro.

Como lo establece la teoría de weibull, para aquellos componentes que están en fase de envejecimiento prematuro se recomienda realizar un análisis económico para sustitución programada y evitar que se presenten fallas catastróficas. Después de revisar esta información el grupo de desarrollo del RCM y el gerente de mantenimiento, se establece que la bomba de liberación de frenos será cambiada cada 12000 hrs de trabajo, condición en la que todavía se tendría un 30% de confiabilidad para este componente.

Esta labor se realizará bajo órdenes de trabajo programadas. El grupo de planeación realizará un arqueo mensual en donde revisará las horas componente de las bombas de liberación de frenos de todos los equipos y creará las ordenes de trabajo requeridas para cumplir con esta directriz de mantenimiento. El tiempo para cambio de la bomba de liberación de parqueo es de 12 horas / máquina con 2 técnicos mecánicos, en total 24 Horas / Hombre. El costo de la bomba es de U\$D3906 y el costo de la hora hombre es de U\$D6.17 hrs. El costo de cambiar la bomba de liberación es de aproximadamente U\$4054.

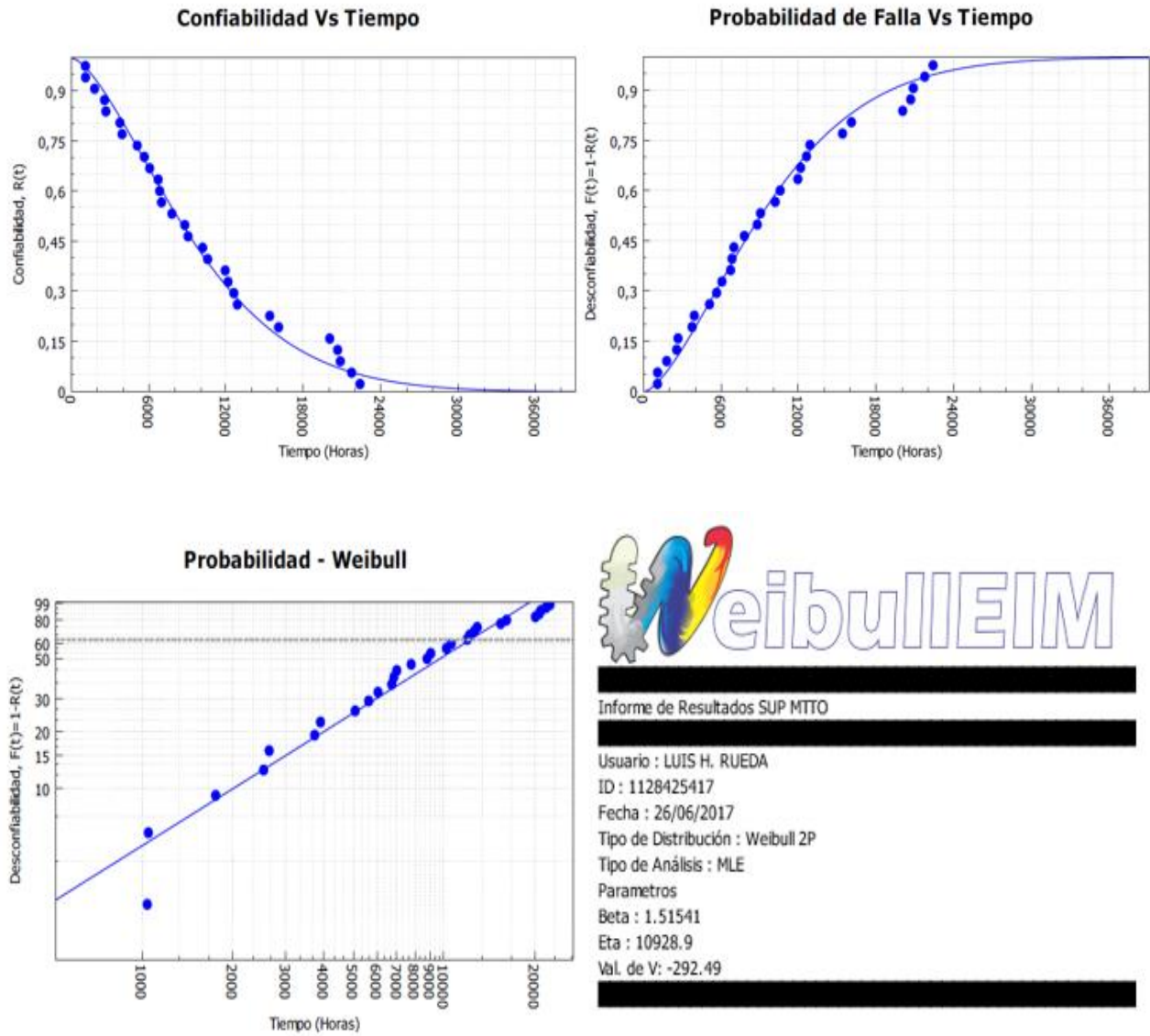
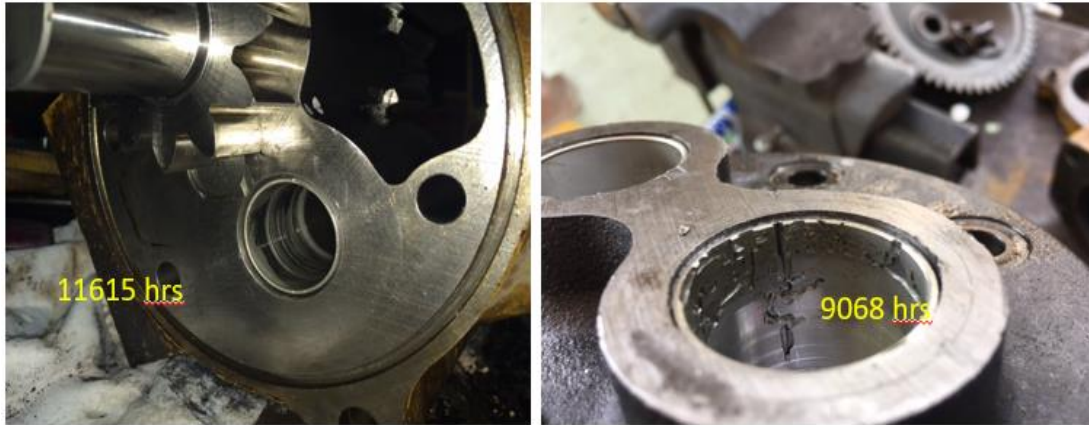


Figura 42. Analisis de weibull para la bomba de liberación de frenos de camiones CAT 777C-777D. Drummond Ltd. Software usado WEIBULLEIM



*Figura 43.* Fotos de algunas bombas de liberación de frenos que han fallado. Drummond Ltd



*Figura 44.* Fotos de algunas bombas de liberación de frenos que han fallado. Drummond Ltd.

### **6.8.Verificación de cumplimientos de objetivos**

A lo largo del trabajo expuesto anteriormente logramos cumplir de manera extensa los objetivos planteado al inicio, y para lograrlo hicimos uso de diferentes metodologías basadas en RCM según el objetivo a cumplir.

Para cumplir el primer objetivo, el cual consiste en aplicar una metodología basada en RCM que permita identificar cuáles son los elementos más críticos del sistema de frenos de los camiones

CAT 777C-D. Hicimos uso de la metodología de AMFE y del análisis de criticidad a través del cálculo del número de prioridad de riesgo NPR, para así, establecer una jerarquización de los elementos cualitativamente y cuantitativamente según su modo de falla. Para lo anterior, definimos que los resultados con NPR mayor de 100 nos indicará la prioridad con la que debe de atacarse cada modo de falla, identificando los elementos críticos.

En el apéndice A y C, se puede observar la definición de funciones y realización de metodología AMFE y el análisis de criticidad para los modos de fallas del sistema de frenos de camiones CAT 777C – 777D correspondientemente. En la tabla 7, se muestra en síntesis cuantitativa, los elementos o procesos más críticos de cada uno de los subsistemas de frenos de camiones CAT 777C – 777D, usando el análisis de criticidad a través del cálculo del número de prioridad de riesgo NPR.

Tabla 7.

*Síntesis cuantitativa de los elementos más críticos del sistema de frenos principales usando el análisis de criticidad a través del cálculo del número de prioridad de riesgo NPR.*

<b>Subsistema de frenos</b>	<b>Elemento</b>	<b>Modo de la Falla</b>	<b>NPR</b>
<i>Sistema de carga de aire.</i>	Secador de aire	Secador de aire con desecante defectuosa.	175
	Válvula de drenaje del tanque	Válvula de drenaje del tanque no funciona.	105
	Operador no abre la válvula de drenaje por desconocimiento.	Operador no abre la válvula de drenaje por desconocimiento.	120
	Válvula cheque del tanque	Válvula cheque del tanque no funciona.	126
	Válvula de protección del sistema neumático	Válvula de protección del sistema neumático no funciona.	160
<i>Sistema de frenos principales</i>	Ajustador de frenos	Ajustador de frenos con fuga interna.	120
	Rotocámara de frenos	Rotocámara de frenos con fuga de aceite o aire.	120
	Válvula relé de frenos		112

		Válvula relé de frenos con fuga neumática.	144
	Válvula de frenos de servicio	Válvula de frenos de servicio con fuga neumática.	144
	Mangueras	Fugas en líneas neumáticas y líneas hidráulicas. Línea neumática o hidráulica completamente rota.	120
	Válvula de retardo manual	Válvula de retardo manual descalibrada. Válvula de retardo manual con fuga de aire	120
	Solenoides en válvula de frenos ARC	Solenoides en válvula de frenos ARC no funcionan.	120
<i>Sistema de frenos secundarios y liberación de parqueo</i>	Válvula de frenos secundarios	Válvula de frenos secundarios con fuga neumática y/o atascada.	160
		Válvula de frenos secundarios con fuga neumática.	192
	Válvula inversora principal	Válvula inversora principal atascada. Válvula de inversora principal con fuga de aire.	192
	Válvula de liberación de frenos	Válvula de liberación de frenos atascada.	192
	Mangueras	Mangueras de aire o aceites rotas.	144
			224
	Bomba de liberación de frenos	Bomba de liberación de frenos atascada por falta de lubricación. Bomba de liberación de frenos atascada por deterioro (fatiga) Bomba de liberación de frenos con fuga externa de aceite.	224 144 336
	Malas conexiones neumáticas de accesorios	Malas conexiones neumáticas de accesorios	126
	Válvula cheque del tanque de aire	Válvula cheque del tanque de aire no funciona.	140
	Sensores de presión	Sensores de presión en corto.	140
Válvula actuadora de liberación de frenos	Válvula actuadora de liberación de frenos atascada.		

Para cumplir el segundo objetivo, el cual consiste en determinar nuevas frecuencias de cambio para los elementos más críticos del sistema de frenos de los camiones CAT 777C-D. Hicimos uso del análisis de weibull para los elementos con histórico representativo, para así, obtener de forma cuantitativa argumentos sólidos. Para los elementos que no tienen histórico suficiente para su análisis, se procedió a tomar acciones conservadoras cualitativas, debido a que la afectación de estos elementos de pequeños costos puede aumentar el riesgo económico y operacional del sistema.

La bomba de liberación de frenos es un elemento importante para el sistema por sus costos, por lo cual, cuenta con trazabilidad en el sistema de mantenimiento PeopleSoft e histórico de falla suficiente para su análisis de weibull, para así, determinar en qué fase de su vida útil se presenta la falla funcional y determinar nueva frecuencia de cambio.

Como se puede observar en la figura 42, la bomba de liberación de frenos presenta fallas por fatiga incipiente y/o prematura. Y siguiendo la recomendación de la teoría de weibull, la cual, dice que para aquellos componentes que están en fase de envejecimiento prematuro recomienda realizar un análisis económico para sustitución programada y evitar que se presenten fallas catastróficas. Establecemos que la bomba de liberación de frenos sea cambiada cada 12000 hrs de trabajo, siendo conservadores, ya que, todavía el elemento tendría un 30% de confiabilidad.

Los demás elementos pequeños en costo y tamaño (pero no menos importantes) del sistema de frenos, se destacan porque anteriormente se cambiaban a falla y las consecuencias de estas acciones impactaban en los riesgos económicos y operacionales de la matriz de AMFE del apéndice A. Por lo anterior, no se cuenta con histórico suficiente para su análisis de weibull, no existe trazabilidad de falla de estos y algunos de ellos no están registrados en el módulo de mantenimiento PeopleSoft como modos de falla. Para dar cumplimiento cualitativo del objetivo,

se establece inspecciones y verificaciones de las funciones en cada PM de 600 horas y se toma la decisión de que estos elementos se cambien cada vez que se realice un cambio de mando final, que, en promedio, tienen una vida útil de 18000 horas.

Para cumplir el tercer y último objetivo, el cual consiste en realizar una actualización del plan de mantenimiento preventivo de los camiones CAT 777C-D, se presentó a la gerencia de mantenimiento de Drummond los resultados obtenidos en este trabajo acerca del sistema de frenos de los camiones CAT 777C-D, donde aprobaron la actualización del plan de mantenimiento actual, acompañado de inclusión de más personal técnico y espacios para capacitaciones internas, para así, refrescar y mejorar los conocimientos y por ende los indicadores de mantenimientos actuales y costos.

Los cambios a destacar en la actualización del plan de mantenimiento preventivo de los camiones CAT 777C-D en el sistema de frenos de los camiones CAT 777C-D son:

- Estandarización de frecuencias de cambios de los elementos más críticos.
- Inclusión de personal humano, para así, cubrir todos los elementos del sistema que concierne a los frenos y realizar las tareas y acciones recomendadas en la matriz AMEF del apéndice B en el mismo tiempo establecido para el PM actual.
- Espacios de tiempos para capacitaciones internas con evaluaciones y seguimiento en el ciclo PHVA.
- Realización de pruebas de fallas funcionales para tomar acción con tiempo.
- Cambio cíclico de elementos del sistema de frenos.

Para concluir el cumplimiento de este tercer objetivo, en los apéndice D y E se puede observar el programa de mantenimiento Actual (Viejo Check list de pautas) y el programa de mantenimiento

actualizado (Nuevo Check list de pautas) para el sistema de frenos de camiones CAT 777C – 777D correspondientemente.

Por todo lo anteriormente mencionado, se logra rediseñar el plan de mantenimiento del sistema de frenos de los camiones CAT 777C-D, a través del desarrollo de un modelo de gestión de mantenimiento centrado en confiabilidad. Donde se considera que el mayor logro como valor agregado, fue obtener un cambio en la cultura de mantenimiento en el equipo de trabajo del área, apoyándonos en capacitación y explicación del desarrollo desde el inicio y fin de este trabajo, para así, obtener los nuevos resultados basados en RCM e impactando positivamente en la corrección de malas prácticas y toma de decisiones soportado en conocimiento y análisis de bibliografía relacionada.

## **7. Conclusiones**

El modelo de gestión de mantenimiento centrado en confiabilidad implementado permitió establecer actividades de gran impacto para evitar contaminaciones en el sistema hidráulico por fallas funcionales en el sistema de frenos; sintetizando un rediseño al plan de mantenimiento actual del sistema de frenos de los camiones CAT 777C- 777D.

Se logró identificar claramente cuáles son los elementos más críticos del sistema de frenos de los camiones CAT 777C – 777D de manera cuantitativa y cualitativa a través de la metodología AMFE y el análisis de criticidades. Enfoque donde juega un papel importante la correcta caracterización y contextualización del sistema estudiado.

A través del árbol lógico de decisión propuesto por Jhon Moubray y el análisis de weibull se pudo establecer frecuencias de cambio para los elementos más críticos del sistema de frenos de los camiones CAT 777C – 777D.

La metodología AMFE usada para analizar las fallas funcionales permitió identificar una gran falencia respecto al personal técnico, como es la falta de conocimiento técnico en el sistema analizado. A raíz de esto se crea un programa de entrenamiento y formatos de evaluación que obtuvieron logros satisfactorios.

El nuevo plan de mantenimiento exige más recursos que el actual, reflejado en mayor número de horas hombre y mayor costo en componentes que son cambiados periódicamente. Sin embargo, el impacto esperado en reducción de contaminaciones hidráulicas permite asumir estos nuevos costos de operación.

A través de la metodología AMFE aplicada se descubrieron nuevos modos de falla que no aún no se tienen implementados en el sistema de mantenimiento PeopleSoft de la empresa Drummond Ltd.

## **8. Recomendaciones**

Inclusión de los nuevos modos de fallas al módulo de mantenimiento en el sistema PeopleSoft de Drummond, para así, documentar asertivamente las nuevas fallas presentadas y poder implementar una metodología que nos lleve a identificar de la causa raíz del problema y minimizar o eliminar los riesgos.

Desarrollar un plan de mantenimiento completo basado en RCM para todo los camiones CAT 777C-C, aplicando la metodología al resto de los sistemas.

Establecer estrategia y/o soluciones de ingeniería que permita diferenciar las afectaciones por contaminación externas entre los diferentes elementos del sistema hidráulico.

Considerar la información del AMEF como recurso de capacitación en los procesos.

### Referencias bibliográficas

Arzuaga, Jose (2011). *Modelo de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) en la flota de equipos de oruga D11N de la empresa minera Drummond Ltd.* Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Borras, Carlos (2017). *Mantenimiento Preventivo.* Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Universidad Industrial de Santander.

Caterpillar. 777D update (AGC) Off Highway Trucks. Service Training Meeting Guide 721. 2000

Deshpande. V. y Modak J. (2002). *Application of RCM to a médium scale industry.* Reliability Engineering and System Safety 77, 31-43.

Drummond Ltd. (2018). Bogotá, Colombia. Recuperado de:  
<https://www.drummondLtd.com/nuestras-operaciones/mina>

INTERNACIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. INTERNACIONAL STANDARD, Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. ISO 14224: 2016.

Marin, Adolfo (2017). *Modelo de gestión de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) para el sistema de riego de camiones tanqueros de la empresa Drummond Ltd.* Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Moubray. Jhon (1997). *Reliability-Centered Maintenance RCM II.* New York: Industrial Press Inc.

Ortiz, Daniel (2016). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad RCM.* Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Universidad Industrial de Santander.

Society of Automotive Engineers. SAE JA1011. Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) processes. 1999.

Society of Automotive Engineers. SAE JA1012. A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard. 2002.

## Apéndice

### Apéndice A. Definición de funciones y realización de metodología AMFE para el sistema de frenos de camiones CAT 777C-777D.

Funciones, Fallas Funcionales, Analisis de Modos y Efectos de Falla - Sistema de carga de aire											
Cód. Func.	Función	Cód. FF	Descripción Falla Funcional	Cód. MF	Modo de Falla	Descripción Efectos	FALLA OCULTA	R. Ambiental	R. Humano	R. Económico	R. Operación
A	Entregar aire a una presión de 120 psi al sistema neumático de frenos	A1	Entrega aire a una presión mayor a 120psi	1	Gobernador de aire descalibrado	Si la presión neumática es muy alta, la presión de frenado se aumenta generando mayor temperatura en el aceite hidráulico. Esta condición disminuye la vida útil de los mandos finales. El compresor de aire tiene un costo superior a los US\$3000	NO	D5	D5	D4	D5
A	Entregar aire a una presión de 120 psi al sistema neumático de frenos	A1	Entrega aire a una presión mayor a 120psi	2	Gobernador de aire no funciona	Si la presión neumática es muy alta, la presión de frenado se aumenta generando mayor temperatura en el aceite hidráulico. Esta condición disminuye la vida útil de los mandos finales. El compresor de aire tiene un costo superior a los US\$3000	NO	D5	D5	D4	D5
A	Entregar aire a una presión de 120 psi al sistema neumático de frenos	A2	Entregar aire a una presión menor de 120 psi	1	Gobernador de aire descalibrado	Si la presión neumática es muy baja, la presión de liberación de frenos en los mandos será muy baja ocasionando que el equipo opere parcialmente frenado. El equipo genera alarmas por baja presión de liberación	NO	D5	D5	D4	D5
A	Entregar aire a una presión de 120 psi al sistema neumático de frenos	A2	Entregar aire a una presión menor de 120 psi	2	Mangueras de aire rotas	Si la presión neumática es muy baja, la presión de liberación de frenos en los mandos será muy baja ocasionando que el equipo opere parcialmente frenado. El equipo genera alarmas por baja presión de liberación.	NO	D5	D5	D4	D5
A	Entregar aire a una presión de 120 psi al sistema neumático de frenos	A3	No entrega aire	1	Compresor de aire no funciona bien	Si el compresor no funciona, el sistema neumático no carga y el equipo no puede liberar presión de parqueo.	NO	C5	C5	C5	C4
B	Entregar aire seco.	B1	No entrega aire seco	1	Secador de aire con desecante defectuosa.	El aire húmedo genera daños en todos los elementos del sistema neumático debido a la oxidación. Esta condición genera que no trabajen bien ocasionando que el equipo trabaje parcialmente frenado y ocasione daños en componentes. Un mando final cuesta más de US\$40000 y las horas invertidas en la reparación serían de 36 hrs.	SI	D5	D5	D1	D2
B	Entregar aire seco.	B1	No entrega aire seco	2	Válvula de drenaje del tanque no funciona.	El aire húmedo genera daños en todos los elementos del sistema neumático debido a la oxidación. Esta condición genera que no trabajen bien ocasionando que el equipo trabaje parcialmente frenado y ocasione daños en componentes. Un mando final cuesta más de US\$40000 y las horas invertidas en la reparación serían de 36 hrs.	SI	D5	D5	D1	D2
B	Entregar aire seco.	B1	No entrega aire seco	3	Operador no abre la válvula de drenaje por desconocimiento.	El aire húmedo genera daños en todos los elementos del sistema neumático debido a la oxidación. Esta condición genera que no trabajen bien ocasionando que el equipo trabaje parcialmente frenado y ocasione daños en componentes. Un mando final cuesta más de US\$40000 y las horas invertidas en la reparación serían de 36 hrs.	SI	D5	D5	D1	D2

## Apéndice A (Continuación)

Funciones, Fallas Funcionales, Analisis de Modos y Efectos de Falla - Sistema de carga de aire											
Cód. Func.	Función	Cód. FF	Descripción Falla Funcional	Cód. MF	Modo de Falla	Descripción Efectos	FALLA OCULTA	R. Ambiental	R. Humano	R. Económ	R. Operación
C	Almacenar aire suficiente para el buen funcionamiento del sistema neumático de frenos	C1	No almacena el aire suficiente.	1	Tanque de almacenamiento de aire roto	El sistema neumático no podría cargar a presión de trabajo y el equipo no podría liberar frenos de parqueo.	NO	C5	C5	C4	C4
C	Almacenar aire suficiente para el buen funcionamiento del sistema neumático de frenos	C1	No almacena el aire suficiente.	2	Válvula cheque del tanque no funciona.	El sistema neumático carga a presión de trabajo pero cuando se activa un freno se descarga fácilmente. Se presentan alarmas de baja presión de liberación.	NO	C5	C5	C5	C3
D	Proteger el sistema neumático de frenos ante fugas y malas conexiones	D1	No protegé el sistema neumático de frenos ante fugas y malas conexiones	1	Válvula de protección del sistema neumático no funciona.	Si se presentan fugas en alguna línea o elemento, ó hay una mala conexión de alguno de los accesorios del sistema (pito, suspensión de silla, limpia parabrisas), la presión de trabajo se perdería y los frenos principales no responderían adecuadamente. Condición de seguridad	SI	C5	C1	C5	C4
E	Dar alarma luminosa y sonora si la presión de aire es inferior a 100 psi	E1	Se presenta alarma a pesar de que la presión del sistema es	1	Switch de presión no funciona	Se presenta alarma y el operador interpreta que el equipo no libera frenos de parqueo.	NO	C5	C5	C5	C5

Funciones, Fallas Funcionales, Analisis de Modos y Efectos de Falla - Sistema de frenos principales											
Cód. Func.	Función	Cód. FF	Descripción Falla Funcional	Cód. MF	Modo de Falla	Descripción Efectos	FALLA OCULTA	R. Ambiental	R. Humano	R. Económ	R. Operación
A	Entregar presión hidráulica de 750psi a los mandos finales cuando se aplica freno de servicio, para frenar el camión.	A1	La presión hidráulica de frenos que llega al mando final es muy inferior a 750psi	1	Ajustador de frenos con fuga interna.	La fuga interna en el ajustador de frenos permite que uno de los mandos finales frene más que el otro y presenta presiones variables. Esto genera que el equipo no frene correctamente.	NO	C5	C4	C4	C4
A	Entregar presión hidráulica de 750psi a los mandos finales cuando se aplica freno de servicio, para frenar el camión.	A1	La presión hidráulica de frenos que llega al mando final es muy inferior a 750psi	2	Rotocámara de frenos con fuga de aceite o aire.	La pérdida de aceite o de aire en la rotocámara de frenos hace que la presión hidráulica que debe llegar a los mandos finales no se la requerida. Esta condición ocasiona que el equipo no frene adecuadamente.	NO	D5	D3	D4	D4
A	Entregar presión hidráulica de 750psi a los mandos finales cuando se aplica freno de servicio, para frenar el camión.	A1	La presión hidráulica de frenos que llega al mando final es muy inferior a 750psi	3	Válvula relay de frenos con fuga neumática.	La pérdida de aire en la válvula ocasiona que la presión neumática que debe llegar a la rotocámara de frenos sea inferior a la requerida. Los mandos finales no tendrán la presión hidráulica necesaria para aplicar los frenos.	NO	D5	D3	D5	D4
A	Entregar presión hidráulica de 750psi a los mandos finales cuando se aplica freno de servicio, para frenar el camión.	A1	La presión hidráulica de frenos que llega al mando final es muy inferior a 750psi	4	Válvula de frenos de servicio con fuga neumática.	La pérdida de aire en la válvula ocasiona que la presión neumática que debe llegar como señal a la válvula relay de frenos no sea la requerida para actuar la rotocámara de frenos. Los mandos finales no tendrán la presión hidráulica necesaria para aplicar los frenos.	NO	C5	C3	C5	C4

## Apéndice A (Continuación)

Funciones, Fallas Funcionales, Analisis de Modos y Efectos de Falla - Sistema de frenos principales											
Cód. Func.	Función	Cód. FF	Descripción Falla Funcional	Cód. MF	Modo de Falla	Descripción Efectos	FAL LA OCU LTA	H. Ambiente	R. Humano	R. Económ	R. Operación
A	Entregar presión hidráulica de 750psi a los mandos finales cuando se aplica freno de servicio, para frenar el camión.	A1	La presión hidráulica de frenos que llega al mando final es muy inferior a 750psi	5	Fugas en líneas neumáticas y líneas hidráulicas.	Las pérdidas neumáticas e hidráulicas en el sistema de frenos de servicio ocasionan que la presión de frenado no sea la correcta. El equipo no frenará correctamente generando condición insegura para el operador y/o personas	NO	E4	E3	E5	E5
A	Entregar presión hidráulica de 750psi a los mandos finales cuando se aplica freno de servicio, para frenar el camión.	A2	La presión hidráulica de frenos es cero "0"	1	Línea neumática o hidráulica completamente rota.	La pérdida total de presión neumática o hidráulica ocasiona que los mandos nunca tengan presión de frenado. El equipo no frenará correctamente generando condición insegura para el	NO	E4	E3	E5	E5
B	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo manual.	B1	La presión hidráulica de frenos que llega a los mandos finales es superior a 520psi.	1	Válvula de retardo manual descalibrada.	Esta válvula se puede calibrar y debe entregar siempre aire a 80 psi hacia la válvula relay de frenos. Si la presión es mayor, los mandos finales estarían frenando como si se usara el freno de servicio. Esta condición recalentaría el aceite debido y cambiaría la viscosidad, generando	SI	O5	O3	O5	O4
B	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo manual.	B2	La presión hidráulica de frenos que llega a los mandos finales es muy inferior a 520 psi	1	Ajustador de frenos con fuga interna.	La fuga interna en el ajustador de frenos permite que uno de los mandos finales frene más que el otro y presenta presiones variables. Esto genera que el equipo no frene correctamente.	SI	O5	O3	O4	O4
B	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo manual.	B2	La presión hidráulica de frenos que llega a los mandos finales es muy inferior a 520 psi	2	Rotocámara de frenos con fuga de aceite o aire.	La pérdida de aceite o de aire en la rotocámara de frenos hace que la presión hidráulica que debe llegar a los mandos finales no se la requerida. Esta condición ocasiona que el equipo no frene	NO	D5	D3	D4	D4
B	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo manual.	B2	La presión hidráulica de frenos que llega a los mandos finales es muy inferior a 520 psi	3	Válvula relay de frenos con fuga neumática.	La pérdida de aire en la válvula ocasiona que la presión neumática que debe llegar a la rotocámara de frenos sea inferior a la requerida. Los mandos finales no tendrán la presión hidráulica necesaria	NO	D5	D3	D5	D4
B	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo manual.	B2	La presión hidráulica de frenos que llega a los mandos finales es muy inferior a 520 psi	4	Válvula de retardo manual con fuga de aire	La pérdida de aire en la válvula ocasiona que la presión neumática que debe llegar como señal a la válvula relay de frenos no sea la requerida para actuar la rotocámara de frenos. Los mandos finales no tendrán la presión hidráulica necesaria para aplicar los frenos.	NO	O5	O3	O5	O4
B	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo manual.	B2	La presión hidráulica de frenos que llega a los mandos finales es muy inferior a 520 psi	5	Fugas en líneas neumáticas y líneas hidráulicas.	Las pérdidas neumáticas e hidráulicas en el sistema de frenos de servicio ocasionan que la presión de frenado no sea la correcta. El equipo no frenará correctamente generando condición insegura para el operador y/o personas	NO	E4	E3	E5	E5

## Apéndice A (Continuación)

Funciones, Fallas Funcionales, Analisis de Modos y Efectos de Falla - Sistema de frenos principales											
Cód. Func.	Función	Cód. FF	Descripción Falla Funcional	Cód. MF	Modo de Falla	Descripción Efectos	FAL LA OCU LTA	H. Ambiente	R. Humano	R. Económ	R. Operación
B	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo manual.	B3	La presión hidráulica de frenos es cero "0"	1	Línea neumática o hidráulica completamente rota.	La pérdida total de presión neumática o hidráulica ocasiona que los mandos nunca tengan presión de frenado.	NO	E4	E3	E5	E5
C	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo automático.	C1	La presión hidráulica de frenos que llega a los mandos finales es muy inferior a 520 psi	1	Ajustador de frenos con fuga interna.	La fuga interna en el ajustador de frenos permite que uno de los mandos finales frene más que el otro y presenta presiones variables. Esto genera que el equipo no frene correctamente.	SI	C5	C3	C4	C4
C	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo automático.	C1	La presión hidráulica de frenos que llega a los mandos finales es muy inferior a 520 psi	2	Rotocámara de frenos con fuga de aceite o aire.	La pérdida de aceite o de aire en la rotocámara de frenos hace que la presión hidráulica que debe llegar a los mandos finales no se la requerida. Esta condición ocasiona que el equipo no frene	NO	D5	D3	D4	D4
C	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo automático.	C1	La presión hidráulica de frenos que llega a los mandos finales es muy inferior a 520 psi	3	Válvula relay de frenos con fuga neumática.	La pérdida de aire en la válvula ocasiona que la presión neumática que debe llegar a la rotocámara de frenos sea inferior a la requerida. Los mandos finales no tendrán la presión hidráulica necesaria	NO	D5	D3	D5	D4
C	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo automático.	C1	La presión hidráulica de frenos que llega a los mandos finales es muy inferior a 520 psi	4	Válvula de frenos de servicio con fuga neumática.	La pérdida de aire en la válvula ocasiona que la presión neumática que debe llegar como señal a la válvula relay de frenos no sea la requerida para actuar la rotocámara de frenos. Los mandos finales no tendrán la presión hidráulica necesaria para aplicar los frenos.	NO	C5	C3	C5	C4
C	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo automático.	C1	La presión hidráulica de frenos que llega a los mandos finales es muy inferior a 520 psi	5	Fugas en líneas neumáticas y líneas hidráulicas.	Las pérdidas neumáticas e hidráulicas en el sistema de frenos de servicio ocasionan que la presión de frenado no sea la correcta. El equipo no frenará correctamente generando condición insegura para el operador y/o personas	NO	E4	E3	E5	E5
C	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo automático.	C2	La presión hidráulica que debe llegar a los mandos finales es cero "0"	1	Línea neumática o hidráulica completamente rota.	La pérdida total de presión neumática o hidráulica ocasiona que los mandos nunca tengan presión de frenado.	NO	E4	E3	E5	E5
C	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo automático.	C2	La presión hidráulica que debe llegar a los mandos finales es cero "0"	2	Solenoides en válvula de frenos ARC no funcionan.	Si los solenoides presentan alguna falla, la válvula no se activa y no se envía presión neumática a la válvula relay de frenos.	SI	D5	D5	D5	D4

## Apéndice A (Continuación)

Funciones, Fallas Funcionales, Analisis de Modos y Efectos de Falla - Sistema de frenos secundarios y liberación de parqueo											
Cód. Func.	Función	Cód. FF	Descripción Falla Funcional	Cód.. MF	Modo de Falla	Descripción Efectos	FALLA OCULTA	R. Ambiental	R. Humano	R. Económico	R. Operación
A	Cortar en su totalidad el suministro de presión hidráulica a los mandos finales en caso de emergencia.	A1	No corta en su totalidad el suministro de presión hidráulica a los mandos finales.	1	Valvula de frenos secundarios con fuga neumática y/o atascada.	El equipo puede presentar un frenado de emergencia no tan efectivo. La seguridad del operador estaría comprometida.	NO	D5	D3	D5	D5
A	Cortar en su totalidad el suministro de presión hidráulica a los mandos finales en caso de emergencia.	A1	No corta en su totalidad el suministro de presión hidráulica a los mandos finales.	2	Válvula inversora principal con fuga neumática y/o atascada.	El equipo puede presentar un frenado de emergencia no tan efectivo. La seguridad del operador estaría comprometida.	NO	D5	D3	D5	D5
A	Cortar en su totalidad el suministro de presión hidráulica a los mandos finales en caso de emergencia.	A1	No corta en su totalidad el suministro de presión hidráulica a los mandos finales.	3	Válvula de liberación de frenos atascada.	El equipo puede presentar un frenado de emergencia no tan efectivo. La seguridad del operador estaría comprometida.	NO	D5	D3	D5	D5
A	Cortar en su totalidad el suministro de presión hidráulica a los mandos finales en caso de emergencia.	A1	No corta en su totalidad el suministro de presión hidráulica a los mandos finales.	4	Mangueras de aire rotas.	El equipo puede presentar un frenado de emergencia no tan efectivo. La seguridad del operador estaría comprometida.	NO	D5	D3	D5	D5
B	Entregar una presión hidráulica entre 450 y 650 psi en el sistema de liberación de los mandos finales.	B1	No entrega presión hidráulica a los mandos finales.	1	Bomba de liberación de frenos atascada por falta de lubricación.	No habría presión hidráulica y el equipo se frenaría. Desgaste prematuro de platos y discos de los mandos finales, aumento de temperatura de aceite. Se presentaría contaminación en el sistema hidráulico y el costo de reparación superaría los US\$100.000	NO	D5	D5	D1	D1
B	Entregar una presión hidráulica entre 450 y 650 psi en el sistema de liberación de los mandos finales.	B1	No entrega presión hidráulica a los mandos finales.	2	Bomba de liberación de frenos atascada por deterioro (fatiga)	No habría presión hidráulica y el equipo se frenaría. Desgaste prematuro de platos y discos de los mandos finales, aumento de temperatura de aceite. Se presentaría contaminación en el sistema hidráulico y el costo de reparación superaría los US\$100.000	NO	D5	D5	D1	D1
B	Entregar una presión hidráulica entre 450 y 650 psi en el sistema de liberación de los mandos finales.	B1	No entrega presión hidráulica a los mandos finales.	3	Válvula de liberación de frenos atascada.	No habría presión hidráulica y el equipo se frenaría. Desgaste prematuro de platos y discos de los mandos finales, aumento de temperatura de aceite. Se presentaría contaminación en el sistema hidráulico y el costo de reparación superaría los US\$100.000	SI	D5	D5	D1	D1
B	Entregar una presión hidráulica entre 450 y 650 psi en el sistema de liberación de los mandos finales.	B1	No entrega presión hidráulica a los mandos finales.	4	Válvula inversora principal atascada.	No habría presión hidráulica y el equipo se frenaría. Desgaste prematuro de platos y discos de los mandos finales, aumento de temperatura de aceite. Se presentaría contaminación en el sistema hidráulico y el costo de reparación superaría los US\$100.000	SI	D5	D5	D1	D1
B	Entregar una presión hidráulica entre 450 y 650 psi en el sistema de liberación de los mandos finales.	B2	Entrega una presión hidráulica inferior a los 450 psi.	1	Bomba de liberación de frenos con fuga externa de aceite.	No habría presión hidráulica y el equipo se frenaría. Desgaste prematuro de platos y discos de los mandos finales, aumento de temperatura de aceite. Se presentaría contaminación en el sistema hidráulico y el costo de reparación superaría los US\$100.000	NO	D5	D5	D1	D1
B	Entregar una presión hidráulica entre 450 y 650 psi en el sistema de liberación de los mandos finales.	B2	Entrega una presión hidráulica inferior a los 450 psi.	2	Válvula de inversora primaria con fuga de aire.	No habría presión hidráulica y el equipo se frenaría. Desgaste prematuro de platos y discos de los mandos finales, aumento de temperatura de aceite. Se presentaría contaminación en el sistema hidráulico y el costo de reparación superaría los US\$100.000	NO	D5	D5	D1	D1

## Apéndice A (Continuación)

Funciones, Fallas Funcionales, Analisis de Modos y Efectos de Falla - Sistema de frenos secundarios y liberación de parqueo											
Cód. Func.	Función	Cód. FF	Descripción Falla Funcional	Cód. MF	Modo de Falla	Descripción Efectos	FALTA OCULTA	H. Ambiental	R. Humano	R. Económ	R. Operación
B	Entregar una presión hidráulica entre 450 y 650 psi en el sistema de liberación de los mandos finales.	B2	Entrega una presión hidráulica inferior a los 450 psi.	3	Valvula de frenos secundarios con fuga neumática.	No habría presión hidráulica y el equipo se frenaría. Desgaste prematuro de platos y discos de los mandos finales, aumento de temperatura de aceite. Se presentaría contaminación en el sistema hidráulico y el costo de reparación superaría los	NO	D5	D5	D1	D1
B	Entregar una presión hidráulica entre 450 y 650 psi en el sistema de liberación de los mandos finales.	B2	Entrega una presión hidráulica inferior a los 450 psi.	4	Lineas de aire o de aceite rotas.	La presión neumática y a la vez hidráulica serían disminuidas y el equipo trabajaría parcialmente frenado. desgaste prematuro de platos y discos de los mandos finales, aumento de temperatura de aceite. Las fugas se evidenciarían en las inspecciones preoperacionales.	NO	D4	D5	D4	D4
B	Entregar una presión hidráulica entre 450 y 650 psi en el sistema de liberación de los mandos finales.	B2	Entrega una presión hidráulica inferior a los 450 psi.	5	Malas conexiones neumáticas de accesorios	Si los accesorios del sistema (pito, SCG, silla, entre otros) no están bien conectados en el sistema, estos se consumen el aire requerido para la liberación de freno de parqueo. Esta condición hace que el equipo trabaje parcialmente frenado. Desgaste prematuro de platos y discos de los mandos finales, aumento de temperatura de aceite. Se presentaría contaminación en el sistema hidráulico y el costo de	SI	D5	D5	D1	D1
B	Entregar una presión hidráulica entre 450 y 650 psi en el sistema de liberación de los mandos finales.	B2	Entrega una presión hidráulica inferior a los 450 psi.	6	Válvula cheque del tanque de aire no funciona.	Si la válvula cheque no funciona, el tanque secundario no mantendrá el aire y se disminuirá la presión neumática del sistema. Esta condición hace que el equipo trabaje parcialmente frenado. Desgaste prematuro de platos y discos de los mandos finales, aumento de temperatura de aceite. Se presentaría contaminación en el sistema hidráulico y el costo de reparación superaría los	SI	C5	C5	C1	C1
B	Entregar una presión hidráulica entre 450 y 650 psi en el sistema de liberación de los mandos finales.	B3	Entrega una presión hidráulica superior a 650 psi.	1	Válvula de liberación de frenos atascada.	Equipo frenado totalmente, ruptura de líneas hidráulicas, derrame de aceite.	NO	D3	D5	D3	D3
C	Emitir alarma sonora si la presión entregada a los mandos finales es inferior a 450 psi.	C1	La presión hidráulica es inferior a 450 psi y no emite alarma.	1	Alarma desconectada.	El operador no sabría que la presión ha disminuido y el Equipo frenado, desgaste prematuro de platos y discos de los mandos finales, aumento de temperatura de aceite.	SI	C5	C5	C1	C1
C	Emitir alarma sonora si la presión entregada a los mandos finales es inferior a 450 psi.	C1	La presión hidráulica es inferior a 450 psi y no emite alarma.	4	Sensores de presión en corto.	El operador no sabría que la presión ha disminuido y el Equipo frenado, desgaste prematuro de platos y discos de los mandos finales, aumento de temperatura de aceite (1.000.000	SI	C5	C5	C1	C1

## Apéndice A (Continuación)

Funciones, Fallas Funcionales, Analisis de Modos y Efectos de Falla - Sistema de frenos secundarios y liberación de parqueo											
Cód. Func.	Función	Cód. FF	Descripción Falla Funcional	Cód. MF	Modo de Falla	Descripción Efectos	FAL LA OCU LTA	H. Am bie nta l	R. Hu ma no	R. Econ óm	R. Ope ración
D	Cortar en su totalidad el suministro de presión hidráulica a los mandos finales cuando el equipo se estaciona.	D1	No corta en su totalidad el suministro de presión hidráulica a los mandos finales.	1	Válvula actuadora de liberación de frenos atascada.	Afectación de la integridad del operador, el equipo, y su entorno mas cercano	NO	D5	D1	D3	D5
D	Cortar en su totalidad el suministro de presión hidráulica a los mandos finales cuando el equipo se estaciona.	D1	No corta en su totalidad el suministro de presión hidráulica a los mandos finales.	1	Válvula actuadora de liberación de frenos atascada.	Afectación de la integridad del operador, el equipo, y su entorno mas cercano	NO	D5	D1	D3	D5

## Apéndice B. Selección de tareas de mantenimiento para el sistema de frenos de camiones

### CAT 777C – 777D

Funciones, Fallas Funcionales, Analisis de Modos y Efectos de Falla - Sistema de carga de aire								Selección de tareas - Sistema de carga de aire				
Cód. Func.	Cód. FF	Cód.. MF	FALLA OCULTA	R. Ambiental	R. Humano	R. Económico	R. Operación	Tipo de decisión	Tarea propuesta	Frecuencia	Recursos	Codigo de tarea
A	A1	1	NO	D5	D5	D4	D5	Busqueda de falla	Inspeccionar la presión del sistema y calibrar el gobernador cuando sea necesario ajustar la presión	300 hrs	1 Técnico mecánico	BF-01
A	A1	2	NO	D5	D5	D4	D5	Busqueda de falla	Inspeccionar la presión del sistema y cambiar el gobernador cuando sea necesario ajustar la presión	300 hrs	1 Técnico mecánico	BF-01
A	A2	1	NO	D5	D5	D4	D5	Busqueda de falla	Inspeccionar la presión del sistema y cambiar el gobernador cuando sea necesario ajustar la presión	300 hrs	1 Técnico mecánico	BF-01
A	A2	2	NO	D5	D5	D4	D5	Mantenimiento a condición	Inspeccionar el estado de las líneas de aire y el correcto enrutamiento de estas para evitar daños.	600 hrs	1 Técnico mecánico	MC-01
A	A3	1	NO	C5	C5	C5	C4	Correr a falla				
B	B1	1	SI	D5	D5	D1	D2	Sustitución cíclica	Inspeccionar y cambiar el desecante del secador.	600 hrs	1 Técnico mecánico	SC-01
B	B1	2	SI	D5	D5	D1	D2	Busqueda de falla	Inspeccionar que la válvula de drenaje del tanque de aire principal este funcionando correctamente. Realizar drenaje de agua.	300 hrs	1 Técnico mecánico	BF-02
B	B1	3	SI	D5	D5	D1	D2	Busqueda de falla	El operador debe drenar el tanque cada inicio de turno y reportar si hay anomalías. Modificar preoperacional de equipo.	12 hrs	Operador	BF-02
C	C1	1	NO	C5	C5	C4	C4	Correr a falla				
C	C1	2	NO	C5	C5	C5	C3	Sustitución cíclica	Cambiar válvula cheque del tanque cada vez que se cambie un mando final (en promedio son 18000 hrs).	18000 hrs	1 Técnico mecánico	SC-02
D	D1	1	SI	C5	C1	C5	C4	Sustitución cíclica	Cambiar válvula de protección del sistema neumático cada vez que se cambie un mando final (en promedio son 18000 hrs)	18000 hrs	1 Técnico mecánico	SC-03
E	E1	1	NO	C5	C5	C5	C5	Correr a falla				

## Apéndice B (Continuación)

Funciones, Fallas Funcionales, Analisis de Modos y Efectos de Falla - Sistema de frenos principales								Selección de tareas - Sistema de frenos de servicio				
Cód. Func.	Cód. FF	Cód. MF	FALLA OCULTA	R. Ambiental	R. Humano	R. Económico	R. Operación	Tipo de decisión	Tarea propuesta	Frecuencia	Recursos	Código de tarea
A	A1	1	SI	C5	C3	C4	C4	Busqueda de falla + cambio ciclico	Realizar pruebas al sisema de frenos de manera periodica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar el ajustador de frenos si se encuentra con problemas.	600 hrs	2 Técnicos mecánicos	BF-02
A	A1	2	NO	D5	D3	D4	D4	Busqueda de falla	Realizar pruebas al sisema de frenos de manera periodica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar la rotocamara de frenos si se encuentra con problemas.	600 hrs	2 Técnicos mecánicos	BF-03
A	A1	3	NO	D5	D3	D5	D4	Busqueda de falla	Realizar pruebas al sisema de frenos de manera periodica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar la válvula relay de frenos si se encuentra con problemas.	600 hrs	2 Técnicos mecánicos	BF-04
A	A1	4	NO	C5	C3	C5	C4	Busqueda de falla	Realizar pruebas al sisema de frenos de manera periodica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar la válvula de frenos de servicio si se encuentra con problemas.	600 hrs	2 Técnicos mecánicos	BF-05
A	A1	5	NO	E4	E3	E5	E5	Reacondicionamiento ciclico	Revisar enrutamiento y condición de las líneas de frenos. Anclar y redireccionar cuando sea necesario. Por último reemplazar según matriz de decisión de cambio de líneas.	300 hrs	1 Técnico mecánico	RC-01
A	A2	1	NO	E4	E3	E5	E5	Reacondicionamiento ciclico	Revisar enrutamiento y condición de las líneas de frenos. Anclar y redireccionar cuando sea necesario. Por último reemplazar según matriz de decisión de cambio de líneas.	300 hrs	1 Técnico mecánico	RC-01
B	B1	1	SI	C5	C3	C5	C4	Reacondicionamiento ciclico	Realizar pruebas al sistema de frenos donde se verifique la presión neumática entregada por la válvula de retardo manual. Calibrar cuando se requiera y por último cambiar si es necesario.	600 hrs	2 Técnicos mecánicos	RC-02
B	B2	1	SI	C5	C3	C4	C4	Busqueda de falla + cambio ciclico	Realizar pruebas al sisema de frenos de manera periodica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar el ajustador de frenos si se encuentra con problemas.	600 hrs	2 Técnicos mecánicos	BF-02
B	B2	2	NO	D5	D3	D4	D4	Busqueda de falla	Realizar pruebas al sisema de frenos de manera periodica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar la rotocamara de frenos si se encuentra con problemas.	600 hrs	2 Técnicos mecánicos	BF-03

## Apéndice B (Continuación)

Funciones, Fallas Funcionales, Analisis de Modos y Efectos de Falla - Sistema de frenos principales								Selección de tareas - Sistema de frenos de servicio				
Cód. Func.	Cód. FF	Cód. MF	FALLA OCULTA	R. Ambiental	R. Humano	R. Económico	R. Operación	Tipo de decisión	Tarea propuesta	Frecuencia	Recursos	Código de tarea
B	B2	3	NO	D5	D3	D5	D4	Busqueda de falla	Realizar pruebas al sistema de frenos de manera periódica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar la válvula relay de frenos si se encuentra con problemas.	600 hrs	2 Técnicos mecánicos	BF-04
B	B2	4	NO	C5	C3	C5	C4	Busqueda de falla	Realizar pruebas al sistema de frenos de manera periódica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar la válvula de retardo manual si se encuentra con problemas.	600 hrs	2 Técnicos mecánicos	BF-06
B	B2	5	NO	E4	E3	E5	E5	Reacondicionamiento cíclico	Revisar enrutamiento y condición de las líneas de frenos. Anclar y redireccionar cuando sea necesario. Por último reemplazar según matriz de decisión de cambio de líneas.	300 hrs	1 Técnico mecánico	RC-01
B	B3	1	NO	E4	E3	E5	E5	Reacondicionamiento cíclico	Revisar enrutamiento y condición de las líneas de frenos. Anclar y redireccionar cuando sea necesario. Por último reemplazar según matriz de decisión de cambio de líneas.	300 hrs	1 Técnico mecánico	RC-01
C	C1	1	SI	C5	C3	C4	C4	Busqueda de falla + cambio cíclico	Realizar pruebas al sistema de frenos de manera periódica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar el ajustador de frenos si se encuentra con problemas.	600 hrs	2 Técnicos mecánicos	BF-02
C	C1	2	NO	D5	D3	D4	D4	Busqueda de falla	Realizar pruebas al sistema de frenos de manera periódica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar la rotocámara de frenos si se encuentra con problemas.	600 hrs	2 Técnicos mecánicos	BF-03
C	C1	3	NO	D5	D3	D5	D4	Busqueda de falla	Realizar pruebas al sistema de frenos de manera periódica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar la válvula relay de frenos si se encuentra con problemas.	600 hrs	2 Técnicos mecánicos	BF-04
C	C1	4	NO	C5	C3	C5	C4	Busqueda de falla	Realizar pruebas al sistema de frenos de manera periódica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar la válvula de ARC si se encuentra con problemas.	600 hrs	2 Técnicos mecánicos	BF-07
C	C1	5	NO	E4	E3	E5	E5	Reacondicionamiento cíclico	Revisar enrutamiento y condición de las líneas de frenos. Anclar y redireccionar cuando sea necesario. Por último reemplazar según matriz de decisión de cambio de líneas.	300 hrs	1 Técnico mecánico	RC-01
C	C2	1	NO	E4	E3	E5	E5	Reacondicionamiento cíclico	Revisar enrutamiento y condición de las líneas de frenos. Anclar y redireccionar cuando sea necesario. Por último reemplazar según matriz de decisión de cambio de líneas.	300 hrs	1 Técnico mecánico	RC-01
C	C2	2	SI	D5	D5	D5	D4	Reacondicionamiento cíclico	Revisar estado de los solenoides de la válvula de ARC periódicamente, limpiar y verificar respuesta. Cambiar si es necesario.	600 hrs	1 Técnico mecánico	RC-03

## Apéndice B (Continuación)

Funciones, Fallas Funcionales, Analisis de Modos y Efectos de Falla - Sistema de frenos secundarios y liberación de parqueo								Selección de tareas - Sistema de frenos secundarios y liberación de parqueo				
Cód. Func.	Cód. FF	Cód.. MF	FALLA OCULTA	R. Ambiental	R. Humano	R. Económ	R. Operación	Tipo de decisión	Tarea propuesta	Frecuencia	Recursos	Codigo de tarea
A	A1	1	NO	D5	D3	D5	D5	Busqueda de falla	Realizar prueba de frenos en el que se verifique la presión neumática y comportamiento de la válvula de frenos secundarios. Cambiar si es necesario.	600 hrs	2 Técnicos mecánicos	BF-08
A	A1	2	NO	D5	D3	D5	D5	Busqueda de falla	Realizar prueba de frenos en el que se verifique la presión neumática y comportamiento de la válvula inversora de frenos. Cambiar si es necesario.	600 hrs	2 Técnicos mecánicos	BF-09
A	A1	3	NO	D5	D3	D5	D5	Busqueda de falla	Realizar prueba de frenos en el que se verifique la presión neumática y comportamiento de la válvula de liberación de parqueo. Cambiar si es necesario.	600 hrs	2 Técnicos mecánicos	BF-10
A	A1	4	NO	D5	D3	D5	D5	Reacondicionamiento ciclico	Revisar enrutamiento y condición de las líneas de frenos. Anclar y redireccionar cuando sea necesario. Por último reemplazar según matriz de decisión de cambio de líneas.	300 hrs	1 Técnico mecánico	RC-01
B	B1	1	NO	D5	D5	D1	D1	Sustitución ciclica	Cambiar la bomba de liberación de frenos cada 12000 horas de trabajo, para mantener un 30% de confiabilidad (analisis de weibull)	12000 hrs	2 Técnicos mecánicos	SC-04
B	B1	2	NO	D5	D5	D1	D1	Sustitución ciclica	Cambiar la bomba de liberación de frenos cada 12000 horas de trabajo, para mantener un 30% de confiabilidad (analisis de weibull)	12000 hrs	2 Técnicos mecánicos	SC-04
B	B1	3	SI	D5	D5	D1	D1	Sustitución ciclica	Cambiar la válvula de liberación de frenos cada vez que se cambie un mando final (en promedio es cada 18000 hrs de servicio)	18000 hrs	2 Técnicos mecánicos	SC-05
B	B1	4	SI	D5	D5	D1	D1	Sustitución ciclica	Cambiar la válvula inversora de frenos cada vez que se cambie un mando final (en promedio es cada 18000 hrs de servicio)	18000 hrs	2 Técnicos mecánicos	SC-06
B	B2	1	NO	D5	D5	D1	D1	Reacondicionamiento ciclico	Inspeccionar la bomba de liberación de frenos de manera periódica para verificar que no presente fugas. Si se encuentran, se corrigen y en el peor de los casos se cambia la bomba.	300 hrs	2 Técnicos mecánicos	RC-04
B	B2	2	NO	D5	D5	D1	D1	Sustitución ciclica	Cambiar la válvula inversora de frenos cada vez que se cambie un mando final (en promedio es cada 18000 hrs de servicio)	18000 hrs	2 Técnicos mecánicos	SC-06
B	B2	3	NO	D5	D5	D1	D1	Sustitución ciclica	Cambiar la válvula de frenos secundarios cada vez que se cambie un mando final (en promedio es cada 18000 hrs de servicio)	18000 hrs	2 Técnicos mecánicos	SC-07
B	B2	4	NO	D4	D5	D4	D4	Reacondicionamiento ciclico	Revisar enrutamiento y condición de las líneas de frenos. Anclar y redireccionar cuando sea necesario. Por último reemplazar según matriz de decisión de cambio de líneas.	300 hrs	1 Técnico mecánico	RC-01
B	B2	5	SI	D5	D5	D1	D1	Reacondicionamiento ciclico	Realizar un test al sistema neumático que permita verificar que todas las conexiones de los accesorios del sistema neumático esten conectados de manera correcta.	600 hrs	2 Técnicos mecánicos	RC-05
B	B2	6	SI	C5	C5	C1	C1	Sustitución ciclica	Cambiar válvula cheque del tanque cada vez que se cambie un mando final (en promedio son 18000 hrs).	18000 hrs	1 Técnico mecánico	SC-08
B	B3	1	NO	D3	D5	D3	D3	Sustitución ciclica	Cambiar la válvula de liberación de frenos cada vez que se cambie un mando final (en promedio es cada 18000 hrs de servicio)	18000 hrs	2 Técnicos mecánicos	SC-05
C	C1	4	SI	C5	C5	C1	C1	Reacondicionamiento ciclico	Verificar el correcto funcionamiento de la alarma cada vez que el equipo llega a mantenimiento preventivo. Verificar sensores de presión y cambiar si es necesario	300 hrs	1 técnico electricista.	RC-06
D	D1	1	NO	D5	D1	D3	D5	Sustitución ciclica	Cambiar la válvula de liberación de frenos cada vez que se cambie un mando final (en promedio es cada 18000 hrs de servicio)	18000 hrs	2 Técnicos mecánicos	SC-05

**Apéndice C. Análisis de criticidad para los modos de fallas del sistema de frenos de camiones CAT 777C – 777D.**

Análisis de Criticidad - Sistema de carga de aire															
Descripción de la Parte o Proceso	Función de la Parte o Proceso	Modo de la Falla	Efecto de la Falla	Causa de la Falla	Acciones Actuales	Ocur renci a	Sever idad	Detecci on	NPR	Acciones Recomendadas	Acciones Adoptadas	Ocur renci a	Sever idad	Detecci on	NPR
Gobernador de aire	Entregar aire a una presión de 120 psi al sistema neumático de frenos	Gobernador de aire descalibrado	Entrega aire a una presión mayor a 120psi	Si la presión neumática es muy alta, la presión de frenado se aumenta generando mayor temperatura en el aceite hidráulico. Esta condición disminuye la vida útil de los mandos finales. El compresor de aire tiene un costo superior a los US\$3000	Nada_correr a falla	4	5	4	80	Inspeccionar la presión del sistema y calibrar el gobernador cuando sea necesario ajustar la presión	Se implanto lo recomendado	3	4	3	36
	Entregar aire a una presión de 120 psi al sistema neumático de frenos	Gobernador de aire no funciona	Entrega aire a una presión mayor a 120psi	Si la presión neumática es muy alta, la presión de frenado se aumenta generando mayor temperatura en el aceite hidráulico. Esta condición disminuye la vida útil de los mandos finales. El compresor de aire tiene un costo superior a los US\$3000	Nada_correr a falla	4	5	4	80	Inspeccionar la presión del sistema y cambiar el gobernador cuando sea necesario ajustar la presión	Se implanto lo recomendado	3	4	3	36
	Entregar aire a una presión de 120 psi al sistema neumático de frenos	Gobernador de aire descalibrado	Entregar aire a una presión menor de 120 psi	Si la presión neumática es muy baja, la presión de liberación de frenos en los mandos será muy baja ocasionando que el equipo opere parcialmente frenado. El equipo genera alarmas por baja presión de liberación	Nada_correr a falla	4	6	4	96	Inspeccionar la presión del sistema y cambiar el gobernador cuando sea necesario ajustar la presión	Se implanto lo recomendado	3	4	3	36
Manguera	Entregar aire a una presión de 120 psi al sistema neumático de frenos	Mangueras de aire rotas	Entregar aire a una presión menor de 120 psi	Si la presión neumática es muy baja, la presión de liberación de frenos en los mandos será muy baja ocasionando que el equipo opere parcialmente frenado. El equipo genera alarmas por baja presión de liberación.	Inspección general de líneas_Sin guía	5	5	3	75	Inspeccionar el estado de las líneas de aire y el correcto enrutamiento de estas para evitar daños. Guía de enrutamiento	Se implanto lo recomendado	3	6	2	36
Compresor de aire	Entregar aire a una presión de 120 psi al sistema neumático de frenos	Compresor de aire no funciona bien	No entrega aire	Si el compresor no funciona, el sistema neumático no carga y el equipo no puede liberar presión de parqueo.	Correr a falla	2	6	3	36		Se implanto lo recomendado	2	6	3	36

## Apéndice C (Continuación)

Secador de aire	Entregar aire seco.	Secador de aire con desecante defectuosa.	No entrega aire seco	El aire húmedo genera daños en todos los elementos del sistema neumático debido a la oxidación. Esta condición genera que no trabajen bien ocasionando que el equipo trabaje parcialmente frenado y ocasione daños en componentes. Un mando final cuesta más de US\$40000 y las horas invertidas en la reparación serían de 36 hrs.	Cambiar silica o desecante de aire cada pm de 2400 hrs	7	5	5	175	Inspeccionar y cambiar el desecante del secador cada 1200 hrs.	Se implanta lo recomendado	4	5	3	60
Válvula de drenaje del tanque	Entregar aire seco.	Válvula de drenaje del tanque no funciona.	No entrega aire seco	El aire húmedo genera daños en todos los elementos del sistema neumático debido a la oxidación. Esta condición genera que no trabajen bien ocasionando que el equipo trabaje parcialmente frenado y ocasione daños en componentes. Un mando final cuesta más de US\$40000 y las horas invertidas en la reparación serían de 36 hrs.	Inspección en cada pm de 300 hrs	5	3	7	105	Inspeccionar que la válvula de drenaje del tanque de aire principal este funcionando correctamente. Realizar drenaje de agua.	Se implanta lo recomendado	4	3	5	60
Operador no abre la válvula de drenaje por desconocimiento.	Entregar aire seco.	Operador no abre la válvula de drenaje por desconocimiento.	No entrega aire seco	El aire húmedo genera daños en todos los elementos del sistema neumático debido a la oxidación. Esta condición genera que no trabajen bien ocasionando que el equipo trabaje parcialmente frenado y ocasione daños en componentes. Un mando final cuesta más de US\$40000 y las horas invertidas en la reparación serían de 36 hrs.	Drenaje por parte del operador.	8	3	5	120	El operador debe drenar el tanque cada inicio de turno y reportar si hay anomalías. Modificar preoperacional de equipo.	Se implanta lo recomendado	3	3	5	45
Tanque de almacenamiento de aire	Almacenar aire suficiente para el buen funcionamiento del sistema neumático de frenos	Tanque de almacenamiento de aire roto	No almacena el aire suficiente.	El sistema neumático no podría cargar a presión de trabajo y el equipo no podría liberar frenos de parqueo.	Correr a falla	3	6	2	36		Se implanta lo recomendado	3	6	2	36
Válvula cheque del tanque	Almacenar aire suficiente para el buen funcionamiento del sistema neumático de frenos	Válvula cheque del tanque no funciona.	No almacena el aire suficiente.	El sistema neumático carga a presión de trabajo pero cuando se activa un freno se descarga fácilmente. Se presentan alarmas de baja presión de liberación.	Nada_correr a falla	3	6	7	126	Cambiar válvula cheque del tanque cada vez que se cambie un mando final (en promedio son 18000 hrs).	Se implanta lo recomendado	2	6	5	60
Válvula de protección del sistema neumático	Proteger el sistema neumático de frenos ante fugas y malas conexiones	Válvula de protección del sistema neumático no funciona.	No protege el sistema neumático de frenos ante fugas y malas conexiones	Si se presentan fugas en alguna línea o elemento, ó hay una mala conexión de alguno de los accesorios del sistema (pito, suspensión de silla, limpia parabrisas), la presión de trabajo se perdería y los frenos principales no responderían adecuadamente. Condición de seguridad para el operador.	Nada_correr a falla	4	8	5	160	Cambiar válvula de protección del sistema neumático cada vez que se cambie un mando final (en promedio son 18000 hrs)	Se implanta lo recomendado	3	8	3	72
Switch de presión	Dar alarma luminosa y sonora si la presión de aire es inferior a 100 psi	Switch de presión no funciona	Se presenta alarma a pesar de que la presión del sistema es superior a 100 psi	Se presenta alarma y el operador interpreta que el equipo no libera frenos de parqueo.	Nada_correr a falla	2	4	4	32		Se implanta lo recomendado	2	4	4	32

## Apéndice C (Continuación)

Análisis de Criticidad - Sistema de frenos principales															
Descripción de la Parte o Proceso	Función de la Parte o Proceso	Modo de la Falla	Efecto de la Falla	Causa de la Falla	Acciones Actuales	Ocurr rencia	Sever idad	Detec cion	NPR	Acciones Recomendadas	Acciones Adoptadas	Ocur rencia	Sever idad	Detec cion	NPR
Ajustador de frenos	Entregar presión hidráulica de 750psi a los mandos finales cuando se aplica freno de servicio, para frenar el camión.	Ajustador de frenos con fuga interna.	La presión hidráulica de frenos que llega al mando final es muy inferior a 750psi	La fuga interna en el ajustador de frenos permite que uno de los mandos finales frene más que el otro y presenta presiones variables. Esto genera que el equipo no frene correctamente.	Prueba de presión cada pm de 1200 hrs	4	6	5	120	Realizar pruebas al sistema de frenos de manera periódica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar el ajustador de frenos si se encuentra con problemas. Prueba cada 600 hrs	Se implantó lo recomendado	3	6	4	72
	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo automático.	Ajustador de frenos con fuga interna.	La presión hidráulica de frenos que llega a los mandos finales es muy inferior a 520 psi	La fuga interna en el ajustador de frenos permite que uno de los mandos finales frene más que el otro y presenta presiones variables. Esto genera que el equipo no frene correctamente.	Prueba de presión cada pm de 1200 hrs	4	6	5	120	Realizar pruebas al sistema de frenos de manera periódica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar el ajustador de frenos si se encuentra con problemas. Prueba cada 600 hrs	Se implantó lo recomendado	3	6	4	72
	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo manual.	Ajustador de frenos con fuga interna.	La presión hidráulica de frenos que llega a los mandos finales es muy inferior a 520 psi	La fuga interna en el ajustador de frenos permite que uno de los mandos finales frene más que el otro y presenta presiones variables. Esto genera que el equipo no frene correctamente.	Prueba de presión cada pm de 1200 hrs	4	6	5	120	Realizar pruebas al sistema de frenos de manera periódica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar el ajustador de frenos si se encuentra con problemas. Prueba cada 600 hrs	Se implantó lo recomendado	3	6	4	72
Rotocámara de frenos	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo manual.	Rotocámara de frenos con fuga de aceite o aire.	La presión hidráulica de frenos que llega a los mandos finales es muy inferior a 520 psi	La pérdida de aceite o de aire en la rotocámara de frenos hace que la presión hidráulica que debe llegar a los mandos finales no se la requerida. Esta condición ocasiona que el equipo no frene adecuadamente.	Prueba de presión cada pm de 1200 hrs	4	6	5	120	Realizar pruebas al sistema de frenos de manera periódica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar la rotocámara de frenos si se encuentra con problemas. Prueba cada 600 hrs	Se implantó lo recomendado	3	6	4	72
	Entregar presión hidráulica de 750psi a los mandos finales cuando se aplica freno de servicio, para frenar el camión.	Rotocámara de frenos con fuga de aceite o aire.	La presión hidráulica de frenos que llega al mando final es muy inferior a 750psi	La pérdida de aceite o de aire en la rotocámara de frenos hace que la presión hidráulica que debe llegar a los mandos finales no se la requerida. Esta condición ocasiona que el equipo no frene adecuadamente.	Prueba de presión cada pm de 1200 hrs	4	6	5	120	Realizar pruebas al sistema de frenos de manera periódica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar la rotocámara de frenos si se encuentra con problemas. Prueba cada 600 hrs	Se implantó lo recomendado	3	6	4	72
	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo automático.	Rotocámara de frenos con fuga de aceite o aire.	La presión hidráulica de frenos que llega a los mandos finales es muy inferior a 520 psi	La pérdida de aceite o de aire en la rotocámara de frenos hace que la presión hidráulica que debe llegar a los mandos finales no se la requerida. Esta condición ocasiona que el equipo no frene adecuadamente.	Prueba de presión cada pm de 1200 hrs	4	6	5	120	Realizar pruebas al sistema de frenos de manera periódica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar la rotocámara de frenos si se encuentra con problemas. Prueba cada 600 hrs	Se implantó lo recomendado	3	6	4	72
Válvula relay de frenos	Entregar presión hidráulica de 750psi a los mandos finales cuando se aplica freno de servicio, para frenar el camión.	Válvula relay de frenos con fuga neumática.	La presión hidráulica de frenos que llega al mando final es muy inferior a 750psi	La pérdida de aire en la válvula ocasiona que la presión neumática que debe llegar a la rotocámara de frenos sea inferior a la requerida. Los mandos finales no tendrán la presión hidráulica necesaria para aplicar los frenos.	Nada_Correr a falla	4	4	7	112	Realizar pruebas al sistema de frenos de manera periódica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar la válvula relay de frenos si se encuentra con problemas.	Se implantó lo recomendado	2	4	3	24
	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo manual.	Válvula relay de frenos con fuga neumática.	La presión hidráulica de frenos que llega a los mandos finales es muy inferior a 520 psi	La pérdida de aire en la válvula ocasiona que la presión neumática que debe llegar a la rotocámara de frenos sea inferior a la requerida. Los mandos finales no tendrán la presión hidráulica necesaria para aplicar los frenos.	Nada_Correr a falla	4	4	7	112	Realizar pruebas al sistema de frenos de manera periódica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar la válvula relay de frenos si se encuentra con problemas.	Se implantó lo recomendado	2	4	3	24
	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo automático.	Válvula relay de frenos con fuga neumática.	La presión hidráulica de frenos que llega a los mandos finales es muy inferior a 520 psi	La pérdida de aire en la válvula ocasiona que la presión neumática que debe llegar a la rotocámara de frenos sea inferior a la requerida. Los mandos finales no tendrán la presión hidráulica necesaria para aplicar los frenos.	Nada_Correr a falla	4	4	7	112	Realizar pruebas al sistema de frenos de manera periódica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar la válvula relay de frenos si se encuentra con problemas.	Se implantó lo recomendado	2	4	3	24

## Apéndice C (Continuación)

Válvula de frenos de servicio	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo automático.	Válvula de frenos de servicio con fuga neumática.	La presión hidráulica de frenos que llega a los mandos finales es muy inferior a 520 psi	La pérdida de aire en la válvula ocasiona que la presión neumática que debe llegar como señal a la válvula relay de frenos no sea la requerida para actuar la rotocámara de frenos. Los mandos finales no tendrán la presión hidráulica necesaria para aplicar los frenos.	Nada_Correr a falla	4	6	6	144	Realizar pruebas al sistema de frenos de manera periódica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar la válvula de frenos de servicio si se encuentra con problemas.	Se implanta lo recomendado	2	6	3	36
	Entregar presión hidráulica de 750psi a los mandos finales cuando se aplica freno de servicio, para frenar el camión.	Válvula de frenos de servicio con fuga neumática.	La presión hidráulica de frenos que llega al mando final es muy inferior a 750psi	La pérdida de aire en la válvula ocasiona que la presión neumática que debe llegar como señal a la válvula relay de frenos no sea la requerida para actuar la rotocámara de frenos. Los mandos finales no tendrán la presión hidráulica necesaria para aplicar los frenos.	Nada_Correr a falla	4	6	6	144	Realizar pruebas al sistema de frenos de manera periódica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar la válvula de frenos de servicio si se encuentra con problemas.	Se implanta lo recomendado	2	6	3	36
Mangueras	Entregar presión hidráulica de 750psi a los mandos finales cuando se aplica freno de servicio, para frenar el camión.	Fugas en líneas neumáticas y líneas hidráulicas.	La presión hidráulica de frenos que llega al mando final es muy inferior a 750psi	Las pérdidas neumáticas e hidráulicas en el sistema de frenos de servicio ocasionan que la presión de frenado no sea la correcta. El equipo no frenará correctamente generando condición insegura para el operador y/o personas alrededor.	Inspección general de líneas_Sin guía	6	6	4	144	Revisar enrutamiento y condición de las líneas de frenos. Andar y redireccionar cuando sea necesario. Por último reemplazar según matriz de decisión de cambio de líneas.	Se implanta lo recomendado	3	6	3	54
	Entregar presión hidráulica de 750psi a los mandos finales cuando se aplica freno de servicio, para frenar el camión.	Línea neumática o hidráulica completamente rota.	La presión hidráulica de frenos es cero "0"	La pérdida total de presión neumática o hidráulica ocasiona que los mandos nunca tengan presión de frenado. El equipo no frenará correctamente generando condición insegura para el operador y/o personas alrededor.	Inspección general de líneas_Sin guía	6	6	4	144	Revisar enrutamiento y condición de las líneas de frenos. Andar y redireccionar cuando sea necesario. Por último reemplazar según matriz de decisión de cambio de líneas.	Se implanta lo recomendado	3	6	3	54
	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo manual.	Fugas en líneas neumáticas y líneas hidráulicas.	La presión hidráulica de frenos que llega a los mandos finales es muy inferior a 520 psi	Las pérdidas neumáticas e hidráulicas en el sistema de frenos de servicio ocasionan que la presión de frenado no sea la correcta. El equipo no frenará correctamente generando condición insegura para el operador y/o personas alrededor.	Inspección general de líneas_Sin guía	6	6	4	144	Revisar enrutamiento y condición de las líneas de frenos. Andar y redireccionar cuando sea necesario. Por último reemplazar según matriz de decisión de cambio de líneas.	Se implanta lo recomendado	3	6	3	54
	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo manual.	Línea neumática o hidráulica completamente rota.	La presión hidráulica de frenos es cero "0"	La pérdida total de presión neumática o hidráulica ocasiona que los mandos nunca tengan presión de frenado.	Inspección general de líneas_Sin guía	6	6	4	144	Revisar enrutamiento y condición de las líneas de frenos. Andar y redireccionar cuando sea necesario. Por último reemplazar según matriz de decisión de cambio de líneas.	Se implanta lo recomendado	3	6	3	54
	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo automático.	Fugas en líneas neumáticas y líneas hidráulicas.	La presión hidráulica de frenos que llega a los mandos finales es muy inferior a 520 psi	Las pérdidas neumáticas e hidráulicas en el sistema de frenos de servicio ocasionan que la presión de frenado no sea la correcta. El equipo no frenará correctamente generando condición insegura para el operador y/o personas alrededor.	Inspección general de líneas_Sin guía	6	6	4	144	Revisar enrutamiento y condición de las líneas de frenos. Andar y redireccionar cuando sea necesario. Por último reemplazar según matriz de decisión de cambio de líneas.	Se implanta lo recomendado	3	6	3	54
	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo automático.	Línea neumática o hidráulica completamente rota.	La presión hidráulica que debe llegar a los mandos finales es cero "0"	La pérdida total de presión neumática o hidráulica ocasiona que los mandos nunca tengan presión de frenado.	Inspección general de líneas_Sin guía	6	6	4	144	Revisar enrutamiento y condición de las líneas de frenos. Andar y redireccionar cuando sea necesario. Por último reemplazar según matriz de decisión de cambio de líneas.	Se implanta lo recomendado	3	6	3	54

## Apéndice C (Continuación)

Válvula de retardo manual	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo manual.	Válvula de retardo manual descalibrada.	La presión hidráulica de frenos que llega a los mandos finales es superior a 520psi.	Esta válvula se puede calibrar y debe entregar siempre aire a 80 psi hacia la válvula relay de frenos. Si la presión es mayor, los mandos finales estarían frenando como si se usara el freno de servicio. Esta condición recalentaría el aceite debido y cambiaría la viscosidad, generando desgaste en todo el componente.	Nada_Correr a falla	4	6	5	120	Realizar pruebas al sistema de frenos donde se verifique la presión neumática entregada por la válvula de retardo manual. Calibrar cuando se requiera y por último cambiar si es necesario.	Se implanto lo recomendado	3	6	3	54
	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo manual.	Válvula de retardo manual con fuga de aire	La presión hidráulica de frenos que llega a los mandos finales es muy inferior a 520 psi	La pérdida de aire en la válvula ocasiona que la presión neumática que debe llegar como señal a la válvula relay de frenos no sea la requerida para actuar la rotocámara de frenos. Los mandos finales no tendrán la presión hidráulica necesaria para aplicar los frenos.	Nada_Correr a falla	4	6	5	120	Realizar pruebas al sistema de frenos de manera periódica donde se verifique la presión de entrega. Test de frenos. Cambiar la válvula de retardo manual si se encuentra con problemas.	Se implanto lo recomendado	3	6	3	54
Solenoides en válvula de frenos ARC	Entrega presión hidráulica hasta de 520 psi en los mandos finales cuando se aplica freno de retardo automático.	Solenoides en válvula de frenos ARC no funcionan.	La presión hidráulica que debe llegar a los mandos finales es cero "0"	Si los solenoides presentan alguna falla, la válvula no se activa y no se envía presión neumática a la válvula relay de frenos.	Nada_Correr a falla	5	6	4	120	Revisar estado de los solenoides de la válvula de ARC periódicamente, limpiar y verificar respuesta. Cambiar si es necesario.	Se implanto lo recomendado	3	6	3	54

## Apéndice C (Continuación)

Análisis de Criticidad - Sistema de frenos secundarios y liberación de parqueo															
Descripción de la Parte o Proceso	Función de la Parte o Proceso	Modo de la Falla	Efecto de la Falla	Causa de la Falla	Acciones Actuales	Ocurriencia	Severidad	Detección	NPR	Acciones Recomendadas	Acciones Adoptadas	Ocurriencia	Severidad	Detección	NPR
Válvula de frenos secundarios	Cortar en su totalidad el suministro de presión hidráulica a los mandos finales en caso de emergencia.	Válvula de frenos secundarios con fuga neumática y/o atascada.	No corta en su totalidad el suministro de presión hidráulica a los mandos finales.	El equipo puede presentar un frenado de emergencia no tan efectivo. La seguridad del operador estaría comprometida.	Prueban cualitativa del equipo cada 300 hrs	4	8	5	160	Realizar prueba de frenos en el que se verifique la presión neumática y comportamiento de la válvula de frenos secundarios. Cambiar si es necesario.	Se implanto lo recomendado	3	8	3	72
	Entregar una presión hidráulica entre 450 y 650 psi en el sistema de liberación de los mandos finales.	Válvula de frenos secundarios con fuga neumática.	Entrega una presión hidráulica inferior a los 450 psi.	No habría presión hidráulica y el equipo se frenaría. Desgaste prematuro de platos y discos de los mandos finales, aumento de temperatura de aceite. Se presentaría contaminación en el sistema hidráulico y el costo de reparación superaría los US100.000	Prueban cualitativa del equipo cada 300 hrs	4	8	6	192	Cambiar la válvula de frenos secundarios cada vez que se cambie un mando final (en promedio es cada 18000 hrs de servicio)	Se implanto lo recomendado	3	8	3	72
Válvula inversora principal	Entregar una presión hidráulica entre 450 y 650 psi en el sistema de liberación de los mandos finales.	Válvula inversora principal atascada.	No entrega presión hidráulica a los mandos finales.	No habría presión hidráulica y el equipo se frenaría. Desgaste prematuro de platos y discos de los mandos finales, aumento de temperatura de aceite. Se presentaría contaminación en el sistema hidráulico y el costo de reparación superaría los US100.000	Nada_correr a falla	4	8	6	192	Cambiar la válvula inversora de frenos cada vez que se cambie un mando final (en promedio es cada 18000 hrs de servicio)	Se implanto lo recomendado	3	8	3	72
	Cortar en su totalidad el suministro de presión hidráulica a los mandos finales en caso de emergencia.	Válvula inversora principal con fuga neumática y/o atascada.	No corta en su totalidad el suministro de presión hidráulica a los mandos finales.	El equipo puede presentar un frenado de emergencia no tan efectivo. La seguridad del operador estaría comprometida.	Nada_correr a falla	3	5	6	90	Realizar prueba de frenos en el que se verifique la presión neumática y comportamiento de la válvula inversora de frenos. Cambiar si es necesario.	Se implanto lo recomendado	3	5	3	45
	Entregar una presión hidráulica entre 450 y 650 psi en el sistema de liberación de los mandos finales.	Válvula de inversora principal con fuga de aire.	Entrega una presión hidráulica inferior a los 450 psi.	No habría presión hidráulica y el equipo se frenaría. Desgaste prematuro de platos y discos de los mandos finales, aumento de temperatura de aceite. Se presentaría contaminación en el sistema hidráulico y el costo de reparación superaría los US100.000	Nada_correr a falla	4	8	6	192	Cambiar la válvula inversora de frenos cada vez que se cambie un mando final (en promedio es cada 18000 hrs de servicio)	Se implanto lo recomendado	3	8	3	72

## Apéndice C (Continuación)


Valvula de liberación de frenos	Corrar en su totalidad el suministro de presión hidráulica a los mandos finales en caso de emergencia.	Válvula de liberación de frenos atascada.	No corta en su totalidad el suministro de presión hidráulica a los mandos finales.	El equipo puede presentar un frenado de emergencia no tan efectivo. La seguridad del operador estaría comprometida.	Nada, correr a falla	3	5	6	90	Realizar prueba de frenos en el que se verifique la presión neumática y con portamiento de la válvula de liberación de parqueo. Cambiar si es necesario.	Se implantar lo recomendado	3	5	3	45
	Entregar una presión hidráulica entre 450 y 650 psi en el sistema de liberación de los mandos finales.	Válvula de liberación de frenos atascada.	Entrega una presión hidráulica superior a 650 psi.	Equipo fendo totalmente, ruptura de líneas hidráulicas, derrame de aceite.	toma de presión hidráulica en pm cada 1200 hrs	3	5	6	90	Cambiar la válvula de liberación de frenos cada vez que se cambie un mando final (en promedio es cada 1800 hrs de servicio)	Se implantar lo recomendado	3	5	3	45
	Entregar una presión hidráulica entre 450 y 650 psi en el sistema de liberación de los mandos finales.	Válvula de liberación de frenos atascada.	No entrega presión hidráulica a los mandos finales.	No habrá presión hidráulica y el equipo se frenará. Desgaste prematuro de platos y discos de los mandos finales, aumento de temperatura de aceite. Se presentaría contaminación en el sistema hidráulico y el costo de reparación superaría los US\$100,000	toma de presión hidráulica en pm cada 1200 hrs	4	8	6	192	Cambiar la válvula de liberación de frenos cada vez que se cambie un mando final (en promedio es cada 1800 hrs de servicio)	Se implantar lo recomendado	3	8	3	72
Mangueras	Corrar en su totalidad el suministro de presión hidráulica a los mandos finales en caso de emergencia.	Mangueras de aire rotas.	No corta en su totalidad el suministro de presión hidráulica a los mandos finales.	El equipo puede presentar un frenado de emergencia no tan efectivo. La seguridad del operador estaría comprometida.	Inspección general de líneas. Sin guía	6	6	4	144	Revisar empujamiento y condición de las líneas de frenos. Andar y redireccionar cuando sea necesario. Por último reemplazar según matriz de decisión de cambio de líneas.	Se implantar lo recomendado	3	6	3	54
	Entregar una presión hidráulica entre 450 y 650 psi en el sistema de liberación de los mandos finales.	Líneas de aire o de aceite rotas.	Entrega una presión hidráulica inferior a los 450 psi.	La presión neumática y a la vez hidráulica serían disminuidas y el equipo trabajaría parcialmente frenado, desgaste prematuro de platos y discos de los mandos finales, aumento de temperatura de aceite. Las fugas se evidenciarían en las inspecciones preoperatoriales.	Inspección general de líneas. Sin guía	6	6	4	144	Revisar empujamiento y condición de las líneas de frenos. Andar y redireccionar cuando sea necesario. Por último reemplazar según matriz de decisión de cambio de líneas.	Se implantar lo recomendado	3	6	3	54
	Entregar una presión hidráulica entre 450 y 650 psi en el sistema de liberación de los mandos finales.	Bomba de liberación de frenos atascada por falta de lubricación.	No entrega presión hidráulica a los mandos finales.	No habrá presión hidráulica y el equipo se frenará. Desgaste prematuro de platos y discos de los mandos finales, aumento de temperatura de aceite. Se presentaría contaminación en el sistema hidráulico y el costo de reparación superaría los US\$100,000	Se toma presión de liberación cada pm de 1200 hrs	4	8	7	224	Cambiar la bomba de liberación de frenos cada 1200 horas de trabajo, para mantener un 30% de confiabilidad (análisis de weibull)	Se implantar lo recomendado	3	8	3	72
Bomba de liberación de frenos	Entregar una presión hidráulica entre 450 y 650 psi en el sistema de liberación de los mandos finales.	Bomba de liberación de frenos atascada por deterioro (fuga)	No entrega presión hidráulica a los mandos finales.	No habrá presión hidráulica y el equipo se frenará. Desgaste prematuro de platos y discos de los mandos finales, aumento de temperatura de aceite. Se presentaría contaminación en el sistema hidráulico y el costo de reparación superaría los US\$100,000	Se toma presión de liberación cada pm de 1200 hrs	4	8	7	224	Cambiar la bomba de liberación de frenos cada 1200 horas de trabajo, para mantener un 30% de confiabilidad (análisis de weibull)	Se implantar lo recomendado	3	8	3	72
	Entregar una presión hidráulica entre 450 y 650 psi en el sistema de liberación de los mandos finales.	Bomba de liberación de frenos con fuga externa de aceite.	Entrega una presión hidráulica inferior a los 450 psi.	No habrá presión hidráulica y el equipo se frenará. Desgaste prematuro de platos y discos de los mandos finales, aumento de temperatura de aceite. Se presentaría contaminación en el sistema hidráulico y el costo de reparación superaría los US\$100,000	Se toma presión de liberación cada pm de 1200 hrs	3	8	6	144	Inspeccionar la bomba de liberación de frenos de manera periódica para verificar que no presente fugas. Si se encuentran, se corrigen y en el peor de los casos se cambia la bomba.	Se implantar lo recomendado	2	8	3	48

## Apéndice C (Continuación)


Valvula de liberación de frenos	Control en su totalidad el suministro de presión hidráulica a los mandos finales cuando el equipo se estaciona.	Valvula actuadora de liberación de frenos atascada.	No corta en su totalidad el suministro de presión hidráulica a los mandos finales.	Afectación de la integridad del operador, el equipo y su entorno mas cercano	Nada, correr a falla	4	7	5	140	Realizar un test al sistema neumático que permita verificar que todas las conexiones de los accesorios del sistema neumático estén conectados de manera correcta.	Se implanta lo recomendado	3	7	3	63
Sensores de presión	Emitir alarma sonora si la presión entregada a los mandos finales es inferior a 450 psi.	Sensores de presión en funcionamiento.	La presión hidráulica es inferior a 450 psi y no emite alarma.	El operador no sabía que la presión ha disminuido y el equipo frenado, desgaste prematuro de platos y discos de los mandos finales, aumento de temperatura de aceite (1.000.000 pesos)	Nada, correr a falla	4	7	5	140	Verificar el correcto funcionamiento de la alarma cada vez que el equipo llega a mantenimiento preventivo. Verificar sensores de presión y cambiar si es necesario	Se implanta lo recomendado	3	7	3	63
Valvula de chequeo del tanque de aire	Entregar una presión hidráulica entre 450 y 650 psi en el sistema de liberación de los mandos finales.	Valvula de chequeo del tanque de aire no funciona.	Entrega una presión hidráulica inferior a los 450 psi.	Si la válvula de chequeo no funciona, el tanque secundario no mantendrá el aire y se disminuirá la presión neumática del sistema. Esta condición hace que el equipo trabaje parcialmente frenado. Desgaste prematuro de platos y discos de los mandos finales, aumento de temperatura de aceite. Se presentaría contaminación en el sistema hidráulico y el costo de reparación superaría los \$5100.000	Nada, correr a falla	3	6	7	126	Cambiar válvula de chequeo del tanque cada vez que se cambie un mando final (en promedio son 18000hrs).	Se implanta lo recomendado	2	6	5	60
Más conexiones neumáticas de accesorios	Entregar una presión hidráulica entre 450 y 650 psi en el sistema de liberación de los mandos finales.	Más conexiones neumáticas de accesorios	Entrega una presión hidráulica inferior a los 450 psi.	Si los accesorios del sistema (plato, SCS, silla, entre otros) no están bien conectados en el sistema, estos se consumen el aire requerido para la liberación de freno de parqueo. Esta condición hace que el equipo trabaje parcialmente frenado. Desgaste prematuro de platos y discos de los mandos finales, aumento de temperatura de aceite. Se presentaría contaminación en el sistema hidráulico y el costo de reparación superaría los \$5100.000	Nada, correr a falla	6	8	7	336	Realizar un test al sistema neumático que permita verificar que todas las conexiones de los accesorios del sistema neumático estén conectados de manera correcta.	Se implanta lo recomendado	3	8	3	72

## Apéndice D. Programa de mantenimiento Actual para el sistema de frenos de camiones

### CAT 777C – 777D. Check list de pautas

		MANTENIMIENTO EQUIPO MOVIL			Código
		LISTA DE CHEQUEO DE MANTENIMIENTO PARA CAMIONES 777 C Y D			Versión 05
Jan-16					
Página 1 de 11					
<b>PRUEBAS - LISTA DE CHEQUEOS SEGURIDAD</b>					
IT	VERIFICACIÓN OPERACIÓN DEL FRENO DE PARQUEO	COMENTARIOS		HORAS HOMBRE	
1	Condiciones de Prueba: 1. Parquear la máquina en un lugar seguro 2. Activar el freno de parqueo. 3. Colocar la palanca de cambios en Primera 4. Incrementar suavemente la velocidad del motor Hasta 1300 Rpm.	TODAS LAS RUTINAS		1	
IT	VERIFICACIÓN OPERACIÓN DEL FRENO DE SERVICIO	COMENTARIOS		HORAS HOMBRE	
2	Condición de la prueba: 1. Parquear la máquina en un Lugar Seguro 2. Pisar a fondo el pedal de freno secundario. 3. Desactive el freno parqueo 4. Colocar la palanca de cambio en primera 5. Incrementar suavemente la velocidad del motor hasta 1300.	TODAS LAS RUTINAS		1	
IT	VERIFICACIÓN OPERACIÓN DEL FRENO DE RETARDADOR MANUAL	COMENTARIOS		HORAS HOMBRE	
3	Condición de la prueba: 1. Parquear la maquina en un Lugar Seguro 2. Aplicar freno retardador manual. 3. Desactivar el Freno parqueo 4. Colocar la palanca de cambio en primera 5. Incrementar suavemente la velocidad del motor hasta 1300.	TODAS LAS RUTINAS		1	
<b>PRUEBAS - CARTA DE PRESIONES (Ver anexo #1)</b>					
17	Ajustador- Retardador	D y H		2	
18	Ajustador- Servicio	D y H		2	
19	Presión Liberación Parqueo	D y H		2	
<b>LISTA DE CHEQUEOS - SISTEMA HIDRÁULICO</b>					
<b>TODAS LAS RUTINAS</b>					
IT	DESCRIPCIÓN	QTY	P/N-P/S	COMENTARIOS	HORAS HOMBRE
2	Realizar diálisis al aceite hidráulico, tomar una muestra antes y otra después de la diálisis . (Con excepción del PMH que se cambia el aceite)			Estas muestras son independientes a la que se envía al laboratorio.	3
4	Cambiar filtro de liberación de parqueo - Cortar filtro y mostrarlo al supervisor				2
8	Revisar líneas hidráulicas por daños y conexiones sueltas.				2
<b>SOLO EN LOS PM D Y H</b>					
IT	DESCRIPCIÓN	QTY	P/N-P/S	COMENTARIOS	HORAS HOMBRE
18	Identificar todas aquellas mangueras del sistema hidráulico en mal estado (deben estar marcadas de color rojo) y proceda a reemplazarlas, de igual manera identificar las líneas mal enrutadas y/o rosando (deben estar marcadas con color blanco) y proceda a enrutarlas y/o instalarle sus respectivos sujetadores.				3
<b>SOLO EN LOS PM H</b>					
IT	DESCRIPCIÓN	QTY	P/N-P/S	COMENTARIOS	HORAS HOMBRE
21	Cambiar respiradero de las rotocamaras.	2	8J-5604		1
23	Cambiar elemento secador de aire y la válvula de alivio.	1	2G-7183		2

## Apéndice E. Programa de mantenimiento actualizado para el sistema de frenos de camiones CAT 777C – 777D. Nuevo Check list de pautas

		MANTENIMIENTO EQUIPO MOVIL			Código	
					Versión 6.3	
<b>LISTA DE CHEQUEO DE MANTENIMIENTO PARA CAMIONES 777 C-D Y 785</b>		Mar-18		Página 1 de 10		
		<span style="background-color: #90EE90; padding: 2px;">TODOS</span> <span style="background-color: #FF6347; padding: 2px;">TECNICO A</span> <span style="background-color: #4682B4; padding: 2px;">TECNICO B</span> <span style="background-color: #FFD700; padding: 2px;">TECNICO C</span> <span style="background-color: #FF8C00; padding: 2px;">CONTRATISTAS</span>				
PRUEBAS - LISTA DE CHEQUEOS SEGURIDAD (FUERA DE HANGAR)						
PARA TODOS LOS TIPOS DE PM						
IT	VERIFICACION DE FRENO DE PARQUEO	COMENTARIOS			HORAS HOMBRE	
1	Condiciones de Prueba 1. Parquear la máquina en un lugar seguro 2. Activar el freno de parqueo. 3. Colocar la palanca de cambios en Primera 4. Incrementar suavemente la velocidad del motor Hasta 1300 Rpm.	El equipo no debe moverse			0.25	
IT	VERIFICACIÓN OPERACIÓN DEL FRENO DE SERVICIO	COMENTARIOS			HORAS HOMBRE	
2	Condición de la prueba: 1.Parquear la máquina en un Lugar Seguro 2. Pisar a fondo el pedal de freno de servicio. 3. Desactive el freno parqueo 4. Colocar la palanca de cambio en primera 5. Incrementar suavemente la velocidad del motor hasta 1300.	El equipo no debe moverse			0.25	
IT	VERIFICACIÓN OPERACIÓN DEL FRENO SECUNDARIO	COMENTARIOS			HORAS HOMBRE	
3	Condición de la prueba: 1.Parquear la máquina en un Lugar Seguro 2. Pisar a fondo el pedal de freno secundario. 3. Desactive el freno parqueo 4. Colocar la palanca de cambio en primera 5. Incrementar suavemente la velocidad del motor hasta 1300.	El equipo no debe moverse			0.25	
IT	VERIFICACIÓN OPERACIÓN DEL FRENO DE RETARDADOR MANUAL	COMENTARIOS			HORAS HOMBRE	
4	Condición de la prueba: 1.Parquear la máquina en un Lugar Seguro 2. Aplicar freno retardador manual. 3. Desactivar el Freno parqueo 4. Colocar la palanca de cambio en primera 5. Incrementar suavemente la velocidad del motor hasta 1300.	El equipo no debe moverse			0.25	
PARA PM TIPO B-F-D-H						
IT	TEST NEUMATICO DE FRENOS	COMENTARIOS			HORAS HOMBRE	
8	Realice test neumático, reporte cualquier anomalía encontrada a su supervisor y notifíquelo en people soft para su corrección	Use el formato adjunto en el check list de respuestas. Use el anexo 11 como ayuda.			4	
DENTRO DEL HANGAR (EQUIPO ENERGIZADO)						
TODOS LOS TIPOS DE PM						
IT	DESCRIPCIÓN	QTY	P/N-P/S	COMENTARIOS	HORAS HOMBRE	
28	Verifique que el sistema neumático cargue a 120 psi, identifique fugas en el sistema y reportelas para tomar los correctivos.				1	
TECNICO B						
TODOS LOS TIPOS DE PM						
IT	DESCRIPCIÓN	QTY	P/N-P/S	COMENTARIOS	HORAS HOMBRE	
1	Cambiar filtro de liberación de parqueo - Cortar filtro y mostrarlo al supervisor	1	1R-0719		2	
5	Revisar pastillas de freno de ambas ruedas por excesivo desgaste y fugas (si usa caliper), repare si es necesario.			Utilice galga de medicion (si pasan dos láminas programe, menos de dos repare)	1	
7	Inspeccionar líneas hidráulicas y marcar con espray blanco todas aquellas que presenten rozamiento o estén mal enrutadas y con espray rojo aquellas que deban ser cambiadas en el próximo pm. <b>Si es un pm tipo D - H, esta labor la realiza el TECNICO C</b>				1	
14	Drenar sucio/sedimentos del tanque reserva de aire principal y secundario, reporte si presenta condensación con agua ó paso de aceite.				1	
PARA PM TIPO B-D-F-H						
IT	DESCRIPCIÓN	QTY	P/N-P/S	COMENTARIOS	HORAS HOMBRE	
19	Realizar diálisis al aceite hidráulico, tomar una muestra antes y otra después de la diálisis . (Con excepción del PM H que se cambia el aceite)			Son dos muestras en total.	2	
TECNICO C						
PARA PM TIPO D-H						
IT	DESCRIPCIÓN	QTY	P/N-P/S	COMENTARIOS	HORAS HOMBRE	
15	Identificar todas aquellas mangueras del sistema hidráulico en mal estado (deben estar marcadas de color rojo) y proceda a reemplazarlas, de igual manera identificar las líneas mal enrutadas y/o rosando (deben estar marcadas con color blanco) y proceda a enrutarlas y/o instalarle sus respectivos sujetadores.				2	
16	Cambiar elemento secador de aire y la válvula de alivio.	1	2G-7183		2	
PARA PM TIPO H						
IT	DESCRIPCIÓN	QTY	P/N-P/S	COMENTARIOS	HORAS HOMBRE	
30	Cambiar respiradero de las rotocamaras.	2	8J-5604		1	
31	Remueva el resorte de la válvula de liberación de parqueo y verifique que se encuentre en correcto estado. Cambielo de presentar alguna falla.				2	
32	Realizar limpieza del bloque y solenoide de la válvula de control de retardo automático.				2	


**Apéndice F. Costo aproximado de reparación por contaminación hidráulica para un  
camión CAT 777D**

<b>Costo aproximado de reparación por contaminación hidráulica para un camion CAT 777D</b>					
<b>Descripcion</b>	<b>U\$D valor</b>	<b>H/H</b>	<b>U\$D Valor H/H</b>	<b>\$ Total H/H</b>	<b>Total</b>
MANDO FINAL LH	52182	24	6.17	148.08	52330.08
MANDO FINAL RH	52182	24	6.17	148.08	52330.08
WHEEL DE PAQUETE LH	15536	24	6.17	148.08	15684.08
WHEEL DE PAQUETE RH	15536	24	6.17	148.08	15684.08
CONVERTIDOR	16737	23	6.17	141.91	16878.91
CILINDRO DE LEVANTE LH	10935	6	6.17	37.02	10972.02
CILINDRO DE LEVANTE RH	10935	6	6.17	37.02	10972.02
V/V LIBERACION DE FRENOS	1764	4	6.17	24.68	1788.68
AJUSTADOR FRONTAL	882	3	6.17	18.51	900.51
AJUSTADOR TRASERO	2116	3	6.17	18.51	2134.51
V/V CONTROL HIDRAULICO	3731	6	6.17	37.02	3768.02
ROTOCAMARA TRASERA	867	4	6.17	24.68	891.68
ROTOCAMARA FRONTAL	812	4	6.17	24.68	836.68
BOMBA DE LEVANTE	2997	6	6.17	37.02	3034.02

ENFRIADOR H/CO --					
CHASIS	3659	6	6.17	37.02	3696.02
PTO- BOMBA	2642	12	6.17	74.04	2716.04
LINEAS HCAS	16621	48	6.17	296.16	16917.16
<b>TOTAL</b>	<b>210134</b>	<b>227</b>		<b>332.664.7</b>	<b>211534.6</b>

## Apéndice G. Formato para evaluación del sistema de frenos de camiones CAT 777C –

### 777D

		PRUEBA DE PRESIONES SISTEMA NEUMÁTICO DE FRENOS DE SERVICIO PARA CAMIONES 777 C/D		VERSION 3.0 19-SEPT-2017			
						Modelo:	
Equipo:		horometro:		Técnicos:		Supervisor:	
<b>Condición de la prueba:</b> Parquear la máquina en un Lugar Seguro, utiliza las cuñas de bloqueo, aplica el control de energías peligrosas en cada prueba.							
Pasos	Presión de aire Especificada	Presión de aceite Especificada	Presión de aire Encontrado	Presión de aceite Encontrada	Presión de aire Ajustada	Presión de aceite Ajustada	
1	VERIFIQUE líneas, válvulas o accesorios por posibles fugas de ser así HAGA EL CORRECTIVO INMEDIATO. Mida la presión neumática del sistema en el tanque principal registre la presión encontrada.	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
2	<b>Aplicar freno retardador manual:</b> 1. mida la presión de aire en la entrada a la roto cámara trasera. 2. la presión de aceite en el mando en el puerto marcado con la letra "S"	RH 528 psi	En la roto cámara trasera	RH LH	En la roto cámara trasera	RH LH	LH
3	<b>Aplicar freno retardador manual (solo equipos con rueda frontal de paquete húmedo):</b> 1. mida la presión de aire en la entrada a la roto cámara frontal. 2. la presión de aceite en el mando en el puerto marcado con la letra "S"	RH 940 psi	En la roto cámara frontal	RH LH	En la roto cámara frontal	RH LH	LH
4	<b>Conecte el ET y active la prueba de retardo automático:</b> 1. mida la presión de aire en la entrada a la roto cámara trasera. 2. la presión de aceite en el mando en el puerto marcado con la letra "S" Tenga en cuenta que este valor es proporcional a la activación del solenoide de ARC, el valor es el especificado cuando este en el 100% de aplicación.	RH 528	En la roto cámara trasera	RH LH	En la roto cámara trasera	RH LH	LH
5	<b>Conecte el ET y active la prueba de retardo automático (solo equipos con rueda frontal de paquete húmedo):</b> 1. mida la presión de aire en la entrada a la roto cámara trasera. 2. la presión de aceite en el mando en el puerto marcado con la letra "S" Tenga en cuenta que este valor es proporcional a la activación del solenoide de ARC, el valor es el especificado cuando este en el 100% de aplicación.	RH 940 psi	En la roto cámara frontal	RH LH	En la roto cámara frontal	RH LH	LH
6	<b>Aplicar freno de servicio</b> 1. mida la presión de aire en la entrada a la roto cámara trasera. 2. la presión de aceite en el mando en el puerto marcado con la letra "S"	RH 750	En la roto cámara trasera	RH LH	En la roto cámara trasera	RH LH	LH
7	<b>Accione el freno de servicio:</b> Si el equipo es de caliper active la palanca selectora de frenos frontales ubicada en el panel de instrumentos lado izquierdo. 1. mida la presión de entrada en la roto cámara frontal. 2. mida la presión de aceite en el caliper montado sobre las ruedas.	Con caliper RH 2760 LH 2760	En la roto cámara frontal	Con caliper RH LH	En la roto cámara frontal	Con caliper RH LH	Con caliper RH LH
8	Aplique freno de parqueo, apague el equipo, verifique el funcionamiento de la válvula de protección descargando la presión retenida en el tanque auxiliar, abra la válvula de purga en la cabina lado derecho hasta que la presión sea 50 psi aproximadamente, los accesorios( silla, limpiavidrios, SCG, pito, sistema de riego) no deben funcionar.	Con paquete húmedo RH 1420 LH 1420	En la roto cámara frontal	Con paquete húmedo RH LH	En la roto cámara frontal	Con paquete húmedo RH LH	Con paquete húmedo RH LH
Cuales accesorios funcionan? Acciones tomadas							

## Apéndice G (continuación)

PRUEBA DE PRESIONES SISTEMA DE FRENO SECUNDARIO																			
Pasos	Presión a altas rpm en vacío	Presión a bajas rpm en vacío	Presión encontrada a altas rpm en vacío	Presión encontrada a bajas rpm en vacío	Presión encontrada a altas rpm en vacío	Presión encontrada a bajas rpm en vacío	Presión ajustada a altas rpm en vacío	Presión ajustada a bajas rpm en vacío											
9	25 psi	2 psi																	
10	<p><b>Presión de aire Especificada</b></p> <p>(80-100) psi</p> <p>En la roto cámara frontal</p>	<p><b>Presión de aceite Especificada</b></p> <p>Caliper</p> <table border="1"> <tr> <td>RH</td> <td>LH</td> </tr> <tr> <td>2070</td> <td>2070</td> </tr> </table> <p>Con paquete húmedo</p>	RH	LH	2070	2070	<p><b>Presión de aire Encontrada</b></p> <p>Caliper</p> <table border="1"> <tr> <td>RH</td> <td>LH</td> </tr> </table>	RH	LH	<p><b>Presión de aceite Encontrada</b></p> <p>Caliper</p> <table border="1"> <tr> <td>RH</td> <td>LH</td> </tr> </table>	RH	LH	<p><b>Presión de aire Ajustada</b></p> <p>Con paquete húmedo</p>	<p><b>Presión de aceite Ajustada</b></p> <p>Caliper</p> <table border="1"> <tr> <td>RH</td> <td>LH</td> </tr> </table>	RH	LH	<p>En la roto cámara frontal</p>	<p>En la roto cámara frontal</p>	<p>Con paquete húmedo</p>
RH	LH																		
2070	2070																		
RH	LH																		
RH	LH																		
RH	LH																		
11	<p><b>Como se encontró:</b></p> <p><b>Que correctivos se tomaron:</b></p>																		
12	<p>En el pistón actuador de la válvula de liberación</p> <p>120 psi</p>	<p>MF RH</p> <p>MF LH</p> <p>A altas RPM 710 psi</p> <p>A bajas Rpm 650psi</p>	<p>En el pistón actuador de la válvula de liberación</p>	<p>MF RH</p> <p>MF LH</p>	<p>En el pistón actuador de la válvula de liberación</p>	<p>MF RH</p> <p>MF LH</p>	<p>En el pistón actuador de la válvula de liberación</p>	<p>MF RH</p> <p>MF LH</p>	<p>En el pistón actuador de la válvula de liberación</p>										
13	<p>En el pistón actuador de la válvula de liberación</p> <p>0 psi</p>	<p>MF RH</p> <p>MF LH</p> <p>0 psi</p>	<p>En el pistón actuador de la válvula de liberación</p>	<p>MF RH</p> <p>MF LH</p>	<p>En el pistón actuador de la válvula de liberación</p>	<p>MF RH</p> <p>MF LH</p>	<p>En el pistón actuador de la válvula de liberación</p>	<p>MF RH</p> <p>MF LH</p>	<p>En el pistón actuador de la válvula de liberación</p>										
<p><b>Nota:</b> Use el manual <b>SENRS610-00</b> como referencia si necesita hacer ajuste en el sistema de aire de frenos.</p> <p><b>Advertencia:</b> Tenga en cuenta que las rotocámara para los frenos con caliper tiene una relación de conversión de 1psi de aire a 23 psi de aceite. La rotocámara para frenos con paquete húmedo tiene una relación de conversión de 1psi de aire a 11.8psi de aceite. La rotocámara trasera la relación es de 1 psi de aire a 6.6 psi de aceite.</p> <p><b>NOTA:</b> Respecto a la cantidad de válvulas relay que debe tener el equipo: 1. Si el equipo es de las series AGC, 3PR y 5ER debe tener 3 válvulas relay de frenos si es de caliper y 2 válvulas relay de frenos si es de paquete húmedo. 2. Si el equipo es de la serie 4XJ, debe tener 2 válvulas relay de frenos si es de caliper y 1 válvula relay de frenos si es de paquete húmedo.</p> <p><b>Comentarios adicionales:</b></p>																			

**Apéndice H. Evaluación de conocimientos sistema de frenos de camiones CAT 777C-D****EVALUACIÓN DE CONOCIMIENTOS****SISTEMA NEUMÁTICO Y DE FRENOS DE CAMIONES CAT 777C – D**

1. En el sistema neumático de los camiones CAT 777C-D. ¿Qué elementos son considerados accesorios del sistema?
  - a) Sistema centralizado de grasa, pistola de limpieza de cabina, ARC, válvula de frenos secundarios.
  - b) Pito, sistema centralizado de grasa, ARC, limpiavidrios, TCS
  - c) Sistema centralizado de grasa, pistola de limpieza de cabina, actuador neumático de la silla, pito, válvula de limpia vidrios.
  - d) Ninguna de las anteriores.
  
2. ¿En qué parte del sistema neumático deben conectarse los accesorios del sistema?
  - a) Antes de la válvula de protección del sistema, para que su funcionamiento quede protegido.
  - b) Después del tanque de aire secundario para asegurar un suministro continuo de aire hacía los accesorios.

- c) Entre la válvula de protección del sistema secundario y la válvula check del tanque de aire secundario, para que el sistema quede protegido en caso de que un accesorio consuma mucho aire del sistema.
  - d) Directamente del tanque principal del sistema.
3. El compresor de aire de servicio puede alimentarse de dos formas distintas, tomando aire del ambiente o tomando aire directamente del post enfriador. Cuando se presenta el segundo caso, ¿qué condiciones debe cumplir accesorio debe tener el compresor de aire de servicio para garantizar un buen funcionamiento?
- a) Ningún accesorio, la línea de alimentación puede estar conectada directamente al compresor.
  - b) Una válvula reguladora que regula la entrada de aire del compresor a 25 psi en todo momento.
  - c) Una válvula reguladora que regula la entrada de aire del compresor a 10 psi en todo momento.
  - d) Una válvula by pass que permite derivar el aire de entrada cuando el compresor ya no lo requiere.
4. ¿Cuál es la presión de apertura de la válvula de alivio del tanque del secador de aire?
- a) 200 PSI
  - b) 150 PSI
  - c) 175 PSI

d) 225 PSI

5. ¿Cuál es la presión de apertura de la válvula de alivio del tanque principal del sistema neumático?

a) 200 PSI

b) 150 PSI

c) 175 PSI

d) 225 PSI

6. ¿Qué función tiene la válvula de protección del sistema secundario de frenos?

a) Proteger la presión del sistema neumático, bloqueando el suministro hacia los accesorios del sistema cuando la presión del sistema disminuye de 70 PSI y volviendo a permitir el paso de aire hacia los accesorios cuando la presión es superior de 80 PSI.

b) Permitir que los accesorios del sistema neumático siempre tengan una presión constante para realizar sus funciones.

c) Proteger la presión del sistema neumático, bloqueando el suministro hacia los accesorios del sistema cuando la presión del sistema disminuye de 55 PSI y volviendo a permitir el paso de aire hacia los accesorios cuando la presión es superior de 65 PSI.

d) Ninguna de las anteriores.

7. ¿Qué características tiene la válvula de frenos secundarios en los camiones CAT de serie AGC?
- a) Es una válvula normalmente abierta ubicada en la parte izquierda del timón. Cuando se activa, esta interrumpe el paso de aire hacia las válvulas de liberación de frenos e inversora de frenos frontales.
  - b) Es una válvula de normalmente cerrada ubicada en la parte inferior como un pedal. Cuando se activa, esta permite el paso de aire hacia la válvula inversora principal permitiendo que se corte el suministro de aire a la válvula de liberación de frenos de parqueo y la válvula inversora de frenos frontales.
  - c) Es una válvula normalmente abierta ubicada como pedal en la parte inferior izquierda del equipo. Cuando se activa, esta permite el paso de aire hacia las válvulas de liberación de frenos e inversora de frenos frontales.
  - d) Es una válvula de normalmente abierta ubicada en la parte inferior como un pedal. Cuando se activa, esta permite el paso de aire hacia la válvula inversora principal permitiendo que se corte el suministro de aire a la válvula de liberación de frenos de parqueo y la válvula inversora de frenos frontales.
8. ¿Qué características tiene la válvula de frenos secundarios en los camiones CAT de series 4XJ, 5ER y 3PR?
- a) Es una válvula normalmente abierta ubicada en la parte izquierda del timón. Cuando se activa, esta interrumpe el paso de aire hacia las válvulas de liberación de frenos e inversora de frenos frontales.

- b) Es una válvula de normalmente cerrada ubicada en la parte inferior como un pedal. Cuando se activa, esta permite el paso de aire hacia la válvula inversora principal permitiendo que se corte el suministro de aire a la válvula de liberación de frenos de parqueo y la válvula inversora de frenos frontales.
- c) Es una válvula normalmente abierta ubicada como pedal en la parte inferior izquierda del equipo. Cuando se activa, esta permite el paso de aire hacia las válvulas de liberación de frenos e inversora de frenos frontales.
- d) Es una válvula de normalmente abierta ubicada en la parte inferior como un pedal. Cuando se activa, esta permite el paso de aire hacia la válvula inversora principal permitiendo que se corte el suministro de aire a la válvula de liberación de frenos de parqueo y la válvula inversora de frenos frontales.

9. Llene la siguiente tabla con el tipo de válvula inversora y la cantidad para cada uno de las series de los camiones 777C-D:

Tipos de válvulas inversoras:

	• TIPO	P/N	P <sub>máx</sub>
1		• 172- 6232	105 PSI
2		• 9D- 8159	85 PSI

•	AGC	4XJ	5ER	3PR
• TIPO:				
• CANTIDAD:				

**10.** ¿Cuál es la relación de entrega de una roto cámara para frenos traseros?

- a) 8 : 1
- b) 5 : 1
- c) 11.8 : 1
- d) 6.6 : 1

**11.** ¿Cuál es la relación de entrega de una roto cámara para frenos frontales, cuando las ruedas tienen frenos de tipo calliper?

- a) 8 : 1
- b) 23 : 1
- c) 11.8 : 1
- d) 6.6 : 1

**12.** ¿Cuál es la relación de entrega de una roto cámara para frenos frontales, cuando las ruedas tienen frenos de tipo paquete húmedo.

- a) 8 : 1

- b) 23 : 1
- c) 11.8 : 1
- d) 6.6 : 1

**13.** Llene la siguiente tabla con el tipo de válvula relay y la cantidad para cada uno de las series de los camiones 777C-D, de acuerdo al tipo de frenos de ruedas frontales:

Tipos de válvulas relay:

Tipo	P/N
1	159-5149
2	5T-7242
3	8X-5444

	AGC		4XJ		5ER		3PR	
	CALLI PER	P. H.	CALL IPER	P. H.	CALL IPER	P. H.	CALLI PER	P. H.
TIPO:								
CANTIDAD:								

**14.** ¿Qué equipos tienen válvula selectora de frenos frontales?

- a) Todos los equipos, sin importar la serie o el tipo de ruedas frontales

- b) Todos los equipos que tienen ruedas con frenos de paquete húmedo.
- c) Todos los equipos que tienen ARC instalado.
- d) Todos los equipos que tienen ruedas con frenos de calliper.

**15.** ¿Qué equipos tienen válvula ratio en el sistema neumático?

- a) Todos los equipos, sin importar la serie o el tipo de ruedas frontales
- b) Todos los equipos que tienen ruedas con frenos de paquete húmedo.
- c) Todos los equipos que tienen ARC instalado.
- d) Todos los equipos que tienen ruedas con frenos de calliper.

**16.** ¿Cómo funciona la válvula ratio del sistema neumático y cuál es su función principal?

- a) Esta válvula se encarga de entregar el doble de lo que recibe directamente a los frenos frontales.
- b) Esta válvula permite que cuando se apliquen los frenos de servicio, el equipo frene primero las ruedas frontales y luego las ruedas traseras. Ella entrega la mitad de lo que recibe, hasta que la presión alcanza los 50 psi.
- c) Esta válvula permite que cuando se apliquen los frenos de servicio, el equipo frene primero las ruedas traseras y luego la rueda frontal, con el objetivo de proporcionar estabilidad. Ella entrega la mitad de la presión que recibe a la roto cámara frontal hasta que la presión alcanza los 60 psi.
- d) Ninguna de las anteriores.

**17.** ¿Cuál es la presión de entrega de las válvulas relay de frenos cuando se activa el retardo manual o automático?

- a) 120 psi
- b) 100 psi
- c) 110 psi
- d) 80 psi

**18.** ¿Cuáles son las presiones de activación y desactivación de la válvula de protección adaptada en la válvula relay de ARC?

- a) Bloquea el paso de aire cuando la presión es inferior a 45 psi y permite el paso cuando la presión es superior a 55 psi.
- b) Bloquea el paso de aire cuando la presión es inferior a 65 psi y permite el paso cuando la presión es superior a 75 psi.
- c) Bloquea el paso de aire cuando la presión es inferior a 70 psi y permite el paso cuando la presión es superior a 80 psi.
- d) Bloquea el paso de aire cuando la presión es inferior a 100 psi y permite el paso cuando la presión es superior a 120 psi.

**19.** ¿Cuál es la diferencia entre una válvula inversora y una válvula relay?

- a) La diferencia radica que en la válvula inversora es normalmente cerrada y cuando llega la señal esta se abre y permite el paso de aire; en cambio la válvula relay es normalmente abierta y cuando llega la señal se cierra y permite el paso de aire.
- b) La diferencia radica que en la válvula relay es normalmente cerrada y cuando llega la señal esta se abre y permite el paso de aire; en cambio la válvula inversora es normalmente abierta y cuando llega la señal se cierra y permite el paso de aire.
- c) Ambas válvulas funcionan igual, la diferencia radica solo en el nombre
- d) La diferencia radica en que la válvula inversora maneja presiones de menor rango en comparación con la válvula relay que maneja presiones más altas.

**20.** Si la alimentación neumática de la válvula diverter no es la adecuada, ¿qué síntomas puede presentar el equipo?

- a) El aceite de enfriamiento de las ruedas frontales y los mandos finales no circularía por el enfriador hidráulico de ruedas frontales que está ubicado en la parte superior del chasis.
- b) El aceite se recalentaría y el equipo mostraría alarmas de alta temperatura.
- c) El aceite se recalentaría y comienza a perder sus propiedades que pueden generar daños en los componentes del sistema hidráulico.
- d) Todas las anteriores son correctas

**21.** ¿Qué puede pasar en el equipo si la válvula inversora de frenos frontales falla?

- a) El equipo queda sin frenos en las ruedas frontales.

- b) Se pierde presión en el sistema neumático, pero el equipo sigue frenando bien }
- c) El equipo se queda sin presión de liberación de freno de parqueo. }
- d) El equipo se frena en sus ruedas frontales

**22.** ¿Qué pasaría si en un equipo de serie AGC, se instalan válvulas inversoras que corresponden a la serie 4XJ?

- a) No pasa nada, el equipo puede trabajar igual
- b) La presión neumática que llega al actuador de la válvula de liberación de frenos de parqueo es mucho mayor y la presión hidráulica aumentaría, manteniendo una buena condición en el equipo.
- c) La presión neumática que llega al actuador de la válvula de liberación de frenos se vería reducida significativamente ocasionando que la presión en los mandos finales disminuya y comience a generar desgaste en los platos y discos del componente.
- d) A y B son correctas.



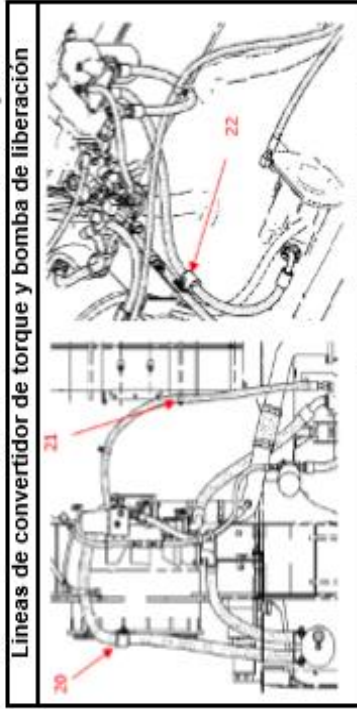
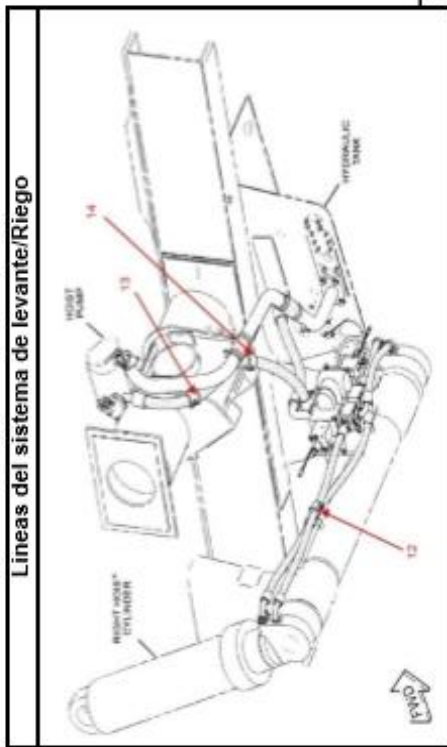
Apéndice I (continuación)



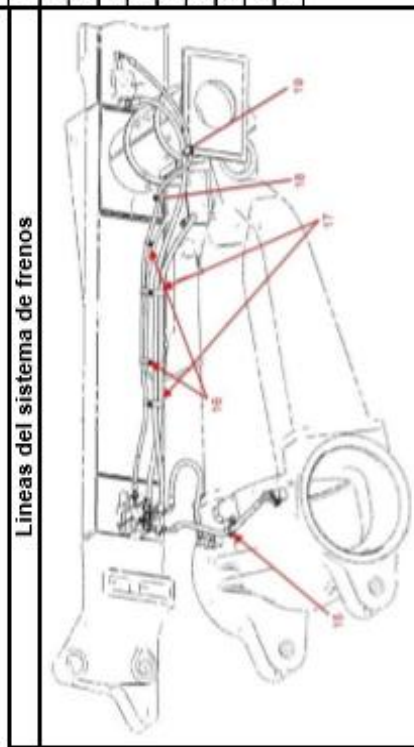
FORMATO DE AUDITORIA DE ENRUTAMIENTO DE LINEAS HIDRAULICAS



Página 2 - 2



Lineas de convertidor de torque y bomba de liberación



Lineas del sistema de frenos

N.	Descripción	Tiene clamp		Esta rozando		Esta dañada		Tomar acción	
		Si	No	Si	No	Si	No	Si	No
12	Lineas de los cilindros de levante								
13	Linea de la bomba al control								
14	Linea de la bomba al control								
15	Linea liberación freno derecho								
16	Linea de la bomba de frenos al control								
17	Linea de retorno de aceite de frenos								
18	Linea de retorno de aceite de frenos								
19	Linea de retorno de aceite de frenos								
20	Linea de bomba de carga de T/C								
21	Linea de bomba de barrido de T/C								
22	Linea de bomba de liberación de frenos								

Describe las acciones a tomar y/o otros hallazgos:

NOTA: Las graficas de este documento son una referencia de las mangueras mas representativas de los sistemas y podrian variar de una serie a otra, utilicelas como guia para la auditoria.