

**METODOLOGÍA MIXTA PARA EL DESARROLLO DE UN PLAN DE
MANTENIMIENTO ENFOCADO A LA REDUCCIÓN DE ERRORES HUMANOS
BAJO LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE FIABILIDAD HUMANA SHERPA**

**LAURA CRISTINA APARICIO ZAFRA
HENYERTH STARLEIN DURANGO VILLADIEGO**

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

2014

**METODOLOGÍA MIXTA PARA EL DESARROLLO DE UN PLAN DE
MANTENIMIENTO ENFOCADO A LA REDUCCIÓN DE ERRORES HUMANOS
BAJO LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE FIABILIDAD HUMANA SHERPA**

**LAURA CRISTINA APARICIO ZAFRA
HENYERTH STARLEIN DURANGO VILLADIEGO**

**Monografía de Grado presentada como requisito para optar el título de
Especialización en Gerencia de Mantenimiento**

**Director: Carlos Flórez
Especialista en Mantenimiento – Ingeniero Mecánico**

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

2014

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

Gracias a Dios porque permite que cada uno
de mis sueños se hagan realidad,
Gracias porque vale la pena creerte.

Gracias a mi esposo, por su comprensión,
apoyo y motivación.

Gracias a mis papás, Pachito y Cris, quienes
formaron en mí, hábitos de estudio y responsabilidad
que hoy permiten que llegue éste momento.

Laura Aparicio Zafra

Doy gracias a Dios con todo mi corazón por
esta Bendición, esto es para alabanza y
gloria de tu nombre Señor

Gracias a mis Hermanos, Elaine Egea, Familiares y Amigos
por creer en mí por el apoyo y motivación
incondicional que me han dado, los amo

Dedico este peldaño más a mi MAMÁ
por darme la oportunidad de ser su hijo

*El señor cree en ti y
te da las fortalezas y las herramientas
para alcanzar las metas tú
solo tienes que tener fe y dar el primer paso.*

Henryeth Durango Villadiego.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
1 CARBONES DEL CERREJÓN LIMITED	15
1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA	16
1.2 VISIÓN	16
1.3 ÁREAS DE DESARROLLO DE LA EMPRESA	17
1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.5 JUSTIFICACIÓN	20
1.6 OBJETIVO GENERAL	21
1.7 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
2 MARCO TEÓRICO	22
2.1 MANTENIMIENTO	22
2.1.1 Evolución del mantenimiento	23
2.2 ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA	26
2.2.1 Failure Mode and Effect Analysis – FMEA	26
2.2.2 Failure Mode and Effect Criticality Analysis - FMECA	28
2.2.3 Reliability Centered Maintenance - RCM	29
2.3 CONFIABILIDAD OPERACIONAL	31
2.3.1 Confiabilidad humana	32
2.3.2 Error humano	34
2.4 TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS DE LA CONFIABILIDAD HUMANA	37
2.4.1 Technique for Human Error Rate Prediction (THERP)	38
2.4.2 Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach (SHERPA) ..	40
3 RECOLECCIÓN & TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	47
3.1 CAMIÓN ELÉCTRICO HITACHI EH5000	47
3.1.1 Funcionamiento General	48
3.2 DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL	50
3.3 OBTENCIÓN DE DATOS	52

3.4 ANÁLISIS DE DATOS	57
3.5 SISTEMA DE DIRECCIÓN CAMIÓN EH5000.....	61
3.5.1 Descripción de componentes Sistema de Dirección	62
3.5.2 Interpretación del plano hidráulico.....	72
4 LA PROPUESTA	75
4.1 DIAGRAMA DE BLOQUE FUNCIONAL.....	75
4.2 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES& CRITICIDAD	77
4.2.1 Matriz de Criticidad.....	79
4.3 DESGLOSE PADRE – HIJO	83
4.4 MODOS DE FALLA	86
4.4.1 Análisis Modos de Falla del Sistema de Dirección	90
4.4.2 Criticidad de los Modos de Falla de equipos/componentes críticos	98
4.5 PLAN DE MATENIMIENTO.....	102
4.6 APLICACIÓN TÉCNICA DE FIABILIDAD HUMANA SHERPA.....	110
4.6.1 Paso 1. Análisis Jerárquico de Tareas	110
4.6.2 Paso 2. Clasificación de las tareas.....	110
4.6.3 Paso 3. Identificación del Error Humano	113
4.6.4 Paso 4. Análisis de las consecuencias.....	114
4.6.5 Paso 5. Análisis de recuperación	114
4.6.6 Paso 6. Análisis de probabilidad ordinal.....	114
4.6.7 Paso 7. Análisis de criticidad.....	114
4.6.8 Paso 8. Análisis remedial	115
5 IMPLEMENTACIÓN	120
6 RECOMENDACIONES.....	121
CONCLUSIONES	122
BIBLIOGRAFIA.....	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de Cerrejón.....	16
Figura 2. Proceso productivo del carbón en Cerrejón.....	17
Figura 3. Etapas de evolución del mantenimiento.	24
Figura 4. Patrones de falla.....	25
Figura 5. Relación entre las metodologías de análisis de modos de falla.	30
Figura 6. Confiabilidad Operacional.....	31
Figura 7. Elementos de la confiabilidad humana.	33
Figura 8. Técnicas de confiabilidad humana.....	38
Figura 9. Camión Hitachi EH5000.....	47
Figura 10. Bloque Funcional Camión EH5000.....	49
Figura 11. Pantallazo reporte mensual Indicadores de Operación.....	53
Figura 12. Indicadores de Operación –pestaña REPETITIVOS.....	54
Figura 13. Indicadores de Operación – pestaña DOWN-LLAM GENERAL.....	54
Figura 14. Indicadores de Operación – pestaña Reporte.....	55
Figura 15. Formato de PM 750 HORAS – RUTA INSPECCIÓN.....	56
Figura 16. Indicadores de Operación: DOWN-LLAM GENERAL.....	58
Figura 17. Diagrama de bloques Sistema de Dirección EH5000.....	61
Figura 18. Componentes del Sistema de Dirección.....	62
Figura 19. Válvula RCB y sus componentes.....	64
Figura 20. Acumuladores de dirección.....	65
Figura 21. Filtro hidráulico de alta presión.....	66
Figura 22. Válvula ORBITROL.....	67
Figura 23. Bomba de dirección.....	69
Figura 24. Montaje Cilindros de dirección.....	70
Figura 25. Válvula amplificadora de flujo de dirección.....	71
Figura 26. Plano hidráulico Sistema de Dirección.....	74
Figura 27. Bloque Funcional Sistema Dirección EH5000.....	76

Figura 28. Ampliación Impacto/Factor a Evaluar – Matriz de Criticidad.....	81
Figura 29. Ampliación Frecuencia de Ocurrencia –Matriz de Criticidad.....	82
Figura 30. Evaluación de criticidad del Tanque hidráulico	84
Figura 31. Evaluación de criticidad de la Bomba de dirección.....	84
Figura 32. Evaluación de criticidad Acumuladores de dirección	85
Figura 33. Evaluación de criticidad Válvula Orbitrol.....	85
Figura 34. Resumen Modos de falla Críticos	98
Figura 35. Diagrama de decisión de Análisis RCM.....	104
Figura 36. HTA: Asegurar que los tornillos que fijan la válvula orbitrol estén instalados y ajustados.....	111
Figura 37. CONTINUACIÓN HTA: Asegurar que los tornillos que fijan la válvula orbitrol estén instalados y ajustados	112

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Taxonomía y modos de error SHERPA	41
Tabla 2. Ejemplo resultado SHERPA.....	44
Tabla 3. Numero de llamados equivalentes a fallas de todos los sistemas del camión	59
Tabla 4. Componente/ Número de fallas por mes.....	60
Tabla 5. Frecuencia de ocurrencia de falla	77
Tabla 6. Definición de variables Sistema dirección EH5000.....	78
Tabla 7. Matriz de Criticidad	80
Tabla 8. Desglose Padre-Hijo y criticidad de componentes.....	83
Tabla 9. Estándar Modos de falla (1)	86
Tabla 10. Estándar Modos de falla (2).....	87
Tabla 11. Estándar Modos de falla (3)	88
Tabla 12. Estándar Modos de falla (4)	89
Tabla 13. Estándar Causa de falla (1)	89
Tabla 14. Estándar Causas de falla (2).....	90
Tabla 15. Tipo de acciones del plan de mantenimiento	102
Tabla 16. Tipo de acciones del plan de mantenimiento.....	103
Tabla 17. Taxonomía y modos de error SHERPA	113

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Análisis Modos de falla Sistema de Dirección del camión EH5000 (1)	.91
Cuadro 2. Análisis Modos de falla Sistema de Dirección del camión EH5000 (2)	.92
Cuadro 3. Análisis Modos de falla Sistema de Dirección del camión EH5000 (3)	.93
Cuadro 4. Análisis Modos de falla Sistema de Dirección del camión EH5000 (4)	.94
Cuadro 5. Análisis Modos de falla Sistema de Dirección del camión EH5000 (5)	.95
Cuadro 6. Análisis Modos de falla Sistema de Dirección del camión EH5000 (6)	.96
Cuadro 7. Análisis Modos de falla Sistema de Dirección del camión EH5000 (7)	.97
Cuadro 8. Criticidad Modos de Falla (1)	.....99
Cuadro 9. Criticidad Modos de falla (2)	.....100
Cuadro 10. Criticidad Modos de falla (3)	.....101
Cuadro 11. Optimización del Plan de Mantenimiento del sistema de dirección camión EH5000 (1)	.....105
Cuadro 12. Optimización del Plan de Mantenimiento del sistema de dirección camión EH5000 (2)	.....106
Cuadro 13. Optimización del Plan de Mantenimiento del sistema de dirección camión EH5000 (3)	.....107
Cuadro 14. Optimización del Plan de Mantenimiento del sistema de dirección camión EH5000 (4)	.....108
Cuadro 15. Optimización del Plan de Mantenimiento del sistema de dirección camión EH5000 (5)	.....109
Cuadro 16. Análisis SHERPA (1)	.....116
Cuadro 17. Análisis SHERPA (2)	.....117
Cuadro 18. Análisis SHERPA (3)	.....118
Cuadro 19. Análisis SHERPA (4)	.....119

RESUMEN

TÍTULO: METODOLOGÍA MIXTA PARA EL DESARROLLO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO ENFOCADO A LA REDUCCIÓN DE ERRORES HUMANOS BAJO LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE FIABILIDAD HUMANA SHERPA*

AUTORES: LAURA APARICIO ZAFRA, HENYERTH DURANGO VILLADIEGO**

PALABRAS CLAVES: CONFIABILIDAD HUMANA, ERROR HUMANO, GESTIÓN DE MANTENIMIENTO, CONFIABILIDAD OPERACIONAL, ANÁLISIS DE FALLA, CRITICIDAD, SHERPA

DESCRIPCIÓN:

Esta monografía describe un paso a paso para implementar una estrategia de mantenimiento enfocada tanto en la confiabilidad de equipos, como en la confiabilidad de las personas que ejecutan las tareas mantenimiento, en este caso, de un camión minero. Sin embargo, se pretende que sirva como guía para realizarse en todo tipo de industria y aplicable para cualquier equipo crítico dentro de ella.

Para entender la metodología propuesta, es necesario contextualizar los temas que se exponen a lo largo del presente trabajo. Por lo tanto, en el primer capítulo, se describe la empresa en la cual se desarrolló la monografía, a partir de allí, se hace el planteamiento del problema, la justificación y se plantean los objetivos que guían la investigación. El segundo capítulo se basa en el marco teórico necesario para entender los temas que se profundizan durante el desarrollo de la propuesta; allí se explican temas como: Mantenimiento, Análisis de modos de falla, Confiabilidad Operacional y Técnicas para el análisis de la Confiabilidad Humana. En el tercer capítulo, se muestra el proceso de recolección y tratamiento de la información, en el cual se indican las fuentes de donde se consiguieron los datos para los posteriores análisis. El cuarto capítulo detalla cómo se lleva a cabo la implementación de la metodología propuesta a través de un caso práctico. Los capítulos quinto y sexto plantean las recomendaciones y conclusiones, respectivamente, del trabajo presentado.

* Monografía

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento.
Director: Carlos Flórez, Ingeniero Mecánico. Especialista en Mantenimiento.

SUMMARY

TITLE: METHODOLOGY TO DEVELOP A MAINTENANCE PLAN FOCUSED ON HUMAN ERROR REDUCTION APPLYING A HUMAN RELIABILITY TECHNIQUE (SHERPA).

AUTHORS: LAURA APARICIO ZAFRA, HENYERTH DURANGO VILLADIEGO **

KEYWORDS: HUMAN RELIABILITY, HUMAN ERROR, MAINTENANCE MANAGEMENT, OPERATIONAL RELIABILITY, FAILURE ANALYSIS, CRITICALITY, SHERPA.

DESCRIPTION:

This document describes how to settle a maintenance strategy based on equipment reliability and human reliability applied to mining trucks. However it could be used as a guide to develop it in any kind of industry.

In order to understand the proposed methodology it is necessary to explain some themes that are going to be mentioned along this document. Therefore, the first chapter describes the company where was developed the monograph, also problem statement, justification and the objectives that guide the research. The second chapter is based on theoretical framework that allows understanding the issues that are exposed during the development of the proposal. The topics explained are: Maintenance, Failure Modes Analysis, Operational Reliability and Techniques for Human Reliability Analysis. In the third chapter, is shown the process of collecting and processing information. It indicates the sources from which data were obtained for further analysis. The fourth chapter details how to carry out the implementation of the proposed methodology through a case of study. The fifth chapter present recommendations and sixth chapter present conclusions of the work presented.

* Monograph

** School of Mechanical Engineering. Maintenance Management Specialization. Director: Carlos Flórez, Mechanical Engineer, Maintenance Specialist.

INTRODUCCIÓN

Según la historia del mantenimiento, los modelos de gestión han evolucionado a medida que la complejidad de las empresas así lo ha demandado. La implementación de estos modelos ha dado origen a los indicadores claves de desempeño que permiten evaluar los resultados de la ejecución de la estrategia de mantenimiento establecida por la empresa. A partir de estos indicadores es posible presentar las reformas necesarias a los planes de mantenimiento que permitan cumplir las metas propuestas.

Sin embargo, dentro de los indicadores claves de desempeño, no se cuenta con alguno que mida la confiabilidad humana, por lo tanto, los errores humanos cometidos en la ejecución de las tareas de mantenimiento no se registran pero afectan directamente la confiabilidad de los equipos. Partiendo de esta consideración, el presente trabajo desarrolla una metodología mixta que puede ser aplicada no solo a la empresa objeto de estudio, sino a cualquier tipo de industria con el objetivo de optimizar la estrategia de mantenimiento fusionando análisis técnicos de criticidad de modos de falla, con análisis cualitativos de confiabilidad humana.

La propuesta la puede realizar un grupo de expertos del sistema analizado, no es obligatorio contar con datos históricos para el análisis de la confiabilidad humana, por lo tanto, resulta ideal para realizar un diagnóstico inicial de la situación en la empresa y plantearse como base para estudios posteriores que incluyan un indicador de la fiabilidad humana y los costos asociados y el lucro cesante cuando se cometen errores en las tareas de mantenimiento.

1 CARBONES DEL CERREJÓN LIMITED



“Cerrejón es un complejo de minería y transporte integrado en La Guajira, departamento ubicado en el extremo norte de Colombia. Abarca una mina a cielo abierto de carbón térmico que produce más de 32 millones de toneladas al año, un ferrocarril de 150 km de largo y un puerto marítimo de cargue directo capaz de recibir buques de hasta 180.000 toneladas de capacidad. Emplea a 10.000 personas, de las cuales más del 99% son nacionales colombianas; es el exportador privado más grande y uno de los más importantes contribuyentes de impuestos en Colombia.

Cerrejón es conocido por sus programas sociales y ambientales, los cuales han merecido premios internacionales. El Sistema de Fundaciones Cerrejón, conformado por cuatro fundaciones, trabaja estrechamente con el Gobierno colombiano y con entes nacionales e internacionales para promover y acelerar el desarrollo sostenible y equitativo de La Guajira y de su gente.

Cerrejón es una empresa conjunta, de gestión independiente, perteneciente en tres partes iguales a BHP Billiton, Anglo American y Glencore Xstrata.”¹

¹CERREJON. Quienes somos. [Consultado 14-08-13] Disponible en <<http://www.cerrejon.com/site/nuestra-empresa/quienes-somos.aspx>>

1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

Figura 1. Ubicación geográfica de Cerrejón.



Fuente: <https://maps.google.es/>

1.2 VISIÓN

“Ser reconocido en el mercado internacional del carbón térmico y en Colombia como el productor y exportador de clase mundial más eficiente y confiable, como un socio excelente que cumple con los estándares más altos en seguridad, salud, medio ambiente y desarrollo sostenible, y como una empresa de comportamiento ético ejemplar, respetuosa de los derechos humanos, y contribuyente efectiva al bienestar y desarrollo de las comunidades en que opera y del país, que promueve la participación, el desarrollo y la excelencia de su gente, y logra la mejor rentabilidad para sus accionistas.”²

²CERREJON. Visión [Consultado 14-08-13] Disponible en <<http://www.cerrejon.com/site/nuestra-empresa/quienes-somos.aspx>>

1.3 ÁREAS DE DESARROLLO DE LA EMPRESA

El proceso de producción del carbón en Cerrejón abarca diferentes áreas de operación que se muestran en la figura 2 y las cuales se enumeran a continuación: primero, Rescate y Relocalización de fauna, segundo, Deforestación y remoción de suelo, tercero, Perforación y Voladura, cuarto, Cargue de material estéril, quinto, Transporte y disposición de material estéril, sexto, Remoción, cargue y transporte de carbón, séptimo, Trituración y/o apilamiento de carbón, octavo, Cargue del tren, noveno, Estación de descargue en Puerto Bolívar, décimo, Apiladores/Remolcadores, undécimo, Embarque del carbón, y por último, Rehabilitación de tierras.

Figura 2. Proceso productivo del carbón en Cerrejón.



Fuente: http://www.cerrejon.com/site/Portals/0/Images/Contents/Nuestra_empresa/proceso_productivo_del_carbon_zoom_02.jpg

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El mantenimiento es un área crítica dentro de cualquier proceso de producción, por eso, contar con las personas competentes para mantenerlos equipos disponibles y operando de manera confiable, representa uno de los desafíos más grandes de las empresas. Por tanto, el éxito de una gestión de mantenimiento va acompañado de una ejecución de tareas con la menor cantidad de errores humanos cometidos, esto es, confiabilidad humana.

El error humano lo definen los autores Ad. Swan y He Guttman como las acciones que exceden límites de aceptabilidad y se encuentran fuera de la tolerancia, muchas investigaciones lo atribuyen como la principal causa en los fallos de un equipo, constituyéndose en factores que desencadenan accidentes; no obstante, en ocasiones se quedan en solo causas cuando no se realiza un análisis de los fallos a profundidad ya que “cuando se analiza todo el sistema de trabajo se puede comprobar que estos errores o infracciones, aunque sean los primeros que aparecen, solo son la punta del iceberg de las deficiencias de la gestión de mantenimiento y seguridad en las organizaciones”³

En la actualidad el incremento de los fallos por errores humanos ha sido notorio, lo cual ha llevado a realizar múltiples estudios que demuestran que las causas de éstos fallos oscilan entre el 70 y 80% (SÁNCHEZ)⁴, las cuales se presentan por instalaciones incompletas, instalaciones inapropiadas, equipos no instalados y no activados, mantenimientos incorrectos, entre otros. Estas cifras han generado la necesidad en las empresas de implementar metodologías (RCM, FMECA, RCA, TPM, PASS 55, THERP, SHERPA, HAZOP ETC.) que permitan su disminución.

³ESCALANTE, José y HERRERO, Jorge. El error humano y el control de las causas de los accidentes. Mapfre Seguridad. N° 94- Segundo Trimestre 2004.

⁴SÁNCHEZ, L. Estudio del factor humano en accidentes de aviación. [consultado 13-02-13]. Disponible en <www.redalyc.uaemex.mx>

Carbones del Cerrejón Limited implementa la metodología RCM para la gestión del mantenimiento de las flotas de equipo minero, entre ellas, la de Camiones Eléctricos, que cuenta con 146 equipos y una meta de disponibilidad del 84%. Estos equipos están asignados a los pasos cuarto y quinto del proceso productivo del carbón descrito en la sección anterior.

La función de los camiones eléctricos es cargar, transportar y descargar material estéril según las disposiciones del plan minero. Para hacer esta tarea es indispensable que el sistema de dirección esté disponible al operador en todo momento, pues si éste pierde el control del equipo debido a alguna falla del sistema, las consecuencias pueden ser fatales, desde volcarse de un nivel a otro, hasta chocar con otro equipo minero. Debido a lo anterior y según datos históricos de fallas, se ha determinado que el sistema de dirección es crítico.

Además, cuando una falla ocurre, que es generalmente en el campo, el técnico de turno va a atender la situación y según su criterio hace las pruebas que cree pertinentes para detectar la falla sin asegurar que reparará el sistema, provocando un mayor número de horas no disponible de los equipos.

Teniendo en cuenta lo anterior, surge el siguiente interrogante que dirige la presente monografía *¿De qué forma se pueden reducir las fallas por error humano en las actividades de mantenimiento del Sistema de Dirección de los camiones eléctricos, para aumentar su disponibilidad y confiabilidad en la empresa?*

1.5 JUSTIFICACIÓN

Este trabajo de investigación busca desarrollar una metodología mixta para la gestión del mantenimiento que permita reducir los índices de fallos y accidentes dentro de las actividades de mantenimiento del sistema hidráulico de dirección de los camiones eléctricos de la empresa Carbones del Cerrejón Limited.

Para esto se dispondrá de un sistema de gestión de mantenimiento basado en la aplicación de la técnica Análisis Modos de Falla, Causa y Criticidad; y la evaluación de las actividades críticas bajo la metodología de confiabilidad humana SHERPA. La aplicación de estas metodologías disminuirían las fallas de los equipos por factores humanos, aumentando la disponibilidad y confiabilidad de los equipos en la compañía. Además, permitiría establecer las pautas para realizar acciones concretas en las personas, evaluar riesgos de los errores y fallas, y establecer planes de mantenimiento que satisfagan las necesidades de la flota.

Este trabajo le dará valor agregado a la empresa para mejorar la confiabilidad de las personas que ejecutan el mantenimiento, mediante recomendaciones específicas en los procedimientos de mantenimiento para disminuir las oportunidades de error humano en la planeación, ejecución, verificación y control del mantenimiento.

Además, se busca hacer un aporte académico a la investigación en Colombia sobre la *Confiabilidad Humana*, que pueda servir de guía a quienes que se interesen en estudiar los modos de falla de los equipos que son causados por errores humanos en las actividades de mantenimiento, proponer acciones para su eliminación o reducción y así aumentar la confiabilidad de las personas responsables del mantenimiento.

1.6 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una metodología mixta de gestión del mantenimiento para la optimización del plan, enfocado a disminuir los fallos por errores humanos que se presentan en la ejecución de las actividades del sistema de dirección de los camiones eléctricos EH5000 de la empresa Carbones del Cerrejón Limited.

1.7 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un plan de mantenimiento para el sistema de dirección de los camiones eléctricos EH5000 utilizando técnicas mixtas para el análisis y criticidad de fallas.
- Analizar una tarea crítica del plan de mantenimiento del sistema de dirección utilizando la técnica SHERPA para identificar la probabilidad y criticidad del error humano.
- Presentar las recomendaciones arrojadas por la aplicación de las técnicas mixtas de análisis y criticidad de fallas; y SHERPA para mejorar la confiabilidad en la ejecución del mantenimiento.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 MANTENIMIENTO

En la actualidad es posible encontrar un sin número de definiciones y conceptos de mantenimiento según los criterios de diferentes autores e instituciones en el mundo. Aquí se tienen algunas de ellas.

Según la NORMA BRITÁNICA. BS 3811, el Mantenimiento es “La combinación de todas las acciones técnicas y administrativas asociadas tendientes a conservar un ítem o restablecerlo a un estado tal que pueda realizar la función requerida”. Indica además que la función requerida puede ser definida como una condición dada.

La ORGANIZACIÓN EUROPEA DE MANTENIMIENTO define el mantenimiento como “La función empresarial a la que se encomienda el control constante de las instalaciones así como el conjunto de los trabajos de reparación y revisión necesarios para garantizar el funcionamiento regular y el buen estado de conservación de las instalaciones productivas, servicios e instrumentación de los establecimientos”.

“El mantenimiento puede ser definido como el conjunto de acciones destinadas a mantener o reacondicionar un componente, equipo o sistema, en un estado en el cual sus funciones pueden ser cumplidas. Entendiendo como función cualquier actividad que un componente, equipo o sistema desempeña, bajo el punto de vista operacional”.⁵

Entonces, se podría decir que el objetivo fundamental del mantenimiento es preservar la función y operación de los equipos de una planta dentro de los

⁵MESA, D; ORTIZ, Y & PINZON M. La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento. Scientia et Technica Año XII, No 30, Mayo de 2006 UTP. ISSN 0122-1701. P. 155

parámetros para lo cual fueron requeridos, optimizando su rendimiento, aumentando la vida útil de éstos y administrando la inversión de los recursos.

2.1.1 Evolución del mantenimiento

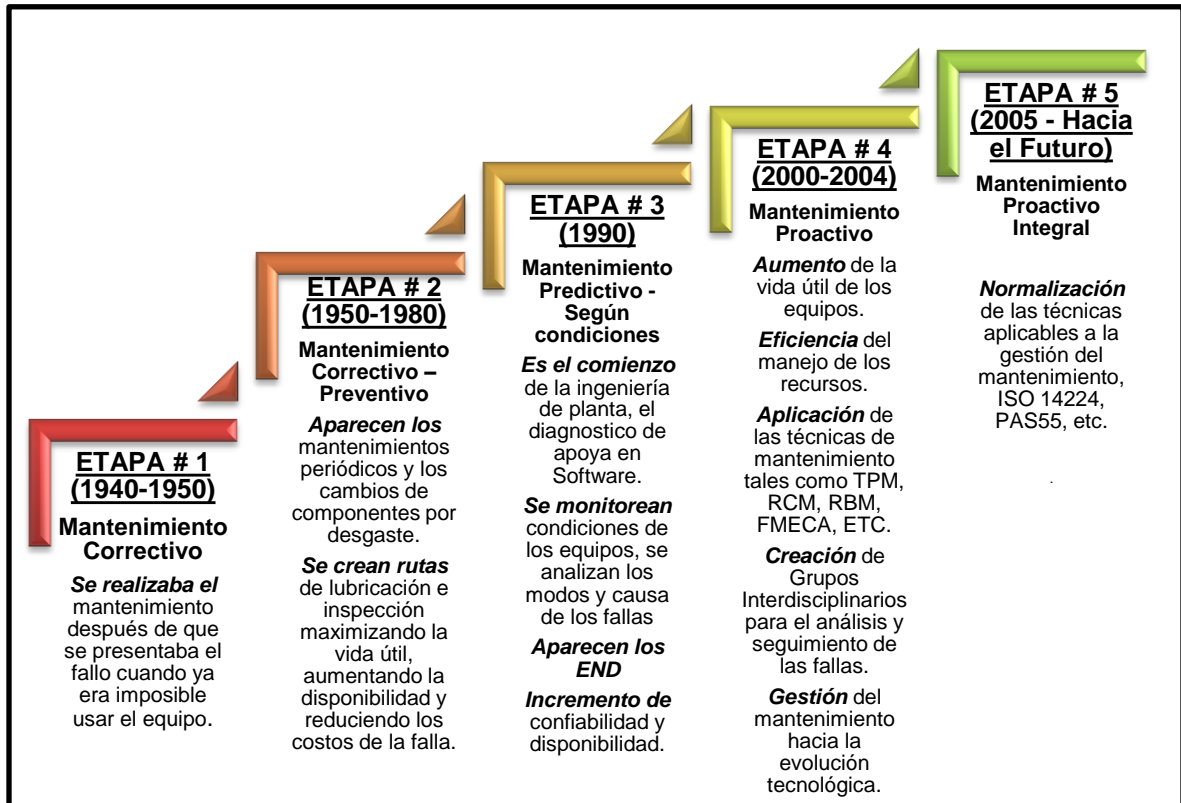
Desde su aparición, más o menos entre los años 1940 y 1950, hasta los días de hoy, el mantenimiento ha dado pasos agigantados en lo que se refiere a tecnología y modelos de gestión. Sin embargo, si se mira hacia atrás, el mantenimiento era considerado un gasto dentro de la empresa ya que en esa época la industria estaba poco mecanizada y por lo tanto, los tiempos fuera de servicio no eran considerados como críticos. Hoy en día el mantenimiento se ha convertido en un eslabón esencial dentro de la cadena de producción de las empresas, por eso, el nuevo enfoque se centra en la eliminación de fallos utilizando técnicas proactivas, ya no basta con eliminar las consecuencias del fallo, sino que se debe encontrar la causa raíz de ese fallo, para eliminarlo y evitar así que se repita.

En un ambiente tan competitivo como en el que se desenvuelven las compañías y las exigencias de cambios constantes de tecnología, el conocimiento de las últimas técnicas de gestión del mantenimiento constituye un camino adecuado para alcanzar una mejora en la eficiencia y en la productividad.

La evolución del mantenimiento (Ver figura 3) ha traído a nuestros días una serie de metodologías y técnicas enfocadas a mejorar la gestión del mantenimiento en las empresas. Algunas de ellas han sido implementadas en empresas nacionales y extranjeras demostrando ser eficientes en la identificación de fallos, aumento de la vida útil de los componentes, mejoras en el desempeño y la disponibilidad de los activos de la empresa. Al mismo tiempo, se han desarrollado normas que definen los lineamientos para la estandarización de estas metodologías, entre

ellas se encuentran: SAE J1739, ISO 14224, PAS55 (ISO 55000 En proceso).Algunas de ellas se detallaran más adelante.

Figura 3. Etapas de evolución del mantenimiento.



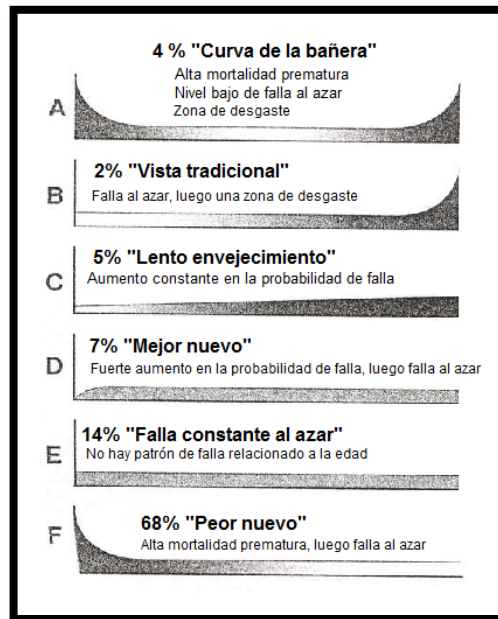
Fuente: Autores

Cabe resaltar que de la mano del mantenimiento también se han desarrollado técnicas para la identificación de los patrones de falla de las máquinas. Las investigaciones realizadas tanto en la academia como en la industria han demostrado que para ciertos equipos, existe poca relación entre el tiempo de operación y la probabilidad de fallo. En un inicio se creía que la probabilidad para que una máquina fallara, aumentaba según el tiempo de operación, siendo mayor la probabilidad de fallo cuando la maquina alcanzaba un periodo en el tiempo llamado “vejez”. Dentro de este rango de fallos se encuentra un patrón de falla que

ha sido muy estudiado en el desarrollo del mantenimiento, este es la curva de la bañera que muestra la tendencia en tres etapas: Muerte infantil, Estabilización y Envejecimiento. Solo un 4 % del total de las fallas presentadas en una planta pertenecen a este tipo de patrón. (Figura 4.A).

Según DiSTEFANO y THOMAS⁶ (2011), analistas expertos del comportamiento de las fallas de los equipos utilizando herramientas como Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) y Modo de Falla y Análisis de Efectos (FMEA), dicta que la gran mayoría de los activos en un típico complejo industrial, alrededor del 89%, no observan un patrón previsible de fallas basadas en tiempo, sólo alrededor del 11% de los activos fallan de esta manera. También se puede notar que el 72% de fallas ocurren en la edad temprana de los equipos, como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Patrones de falla.



⁶DiSTEFANO, Robert y THOMAS, Stephen. Asset Data integrity is Serious Business. New York: Industrial Press, Inc. 2011

Fuente: Tomado de MOUBRAY, John. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (Reliability Centered Maintenance) Edición en Español. Aladon LLC, 2004.

Observando lo anterior, y después de sesenta años de historia, se puede notar un cambio de paradigma en el que es necesario integrar el mantenimiento en la visión estratégica de la empresa, lo cual trae a la compañía madurez desde el punto de vista de la acción (habilidad de desarrollar), de la actitud (deseo de hacer) y del conocimiento (reducción de impacto).

Hablar de mantenimiento integral es cambiar los esquemas establecidos para proponer nuevo estándares e indicadores de clase mundial que lleven a las empresas a ser más competitivas.

2.2 ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA

En esta sección se describen de manera general los métodos para el análisis de modos de falla más usados en la industria debido a los resultados exitosos en su implementación. Entre ellos se tienen: Failure Mode and Effect Analysis (FMEA), Failure Mode and Effect Criticality Analysis (FMECA) y Reliability Centered Maintenance (RCM).

2.2.1 Failure Mode and Effect Analysis – FMEA

Es una técnica de prevención utilizada para identificar variables o parámetros significativos y poder detectar por anticipado los posibles modos de falla de un equipo con el fin de establecer las acciones correctivas necesarias para la prevención del fallo, o la detección del mismo si éste se produce. Estos análisis han sido utilizados desde los años 60s en la industria militar y desde entonces se

han venido implementando en todo tipo de industrias de procesos y productos, arrojando resultados favorables en su aplicación.

Los objetivos al realizar un FMEA son: **A.** Reconocer y evaluar los modos de falla potenciales y las causas asociadas con el diseño y montaje, Operación y Mantenimiento de un equipo, a partir de los ítems mantenibles. **B.** Determinar los efectos de las fallas potenciales en el desempeño del sistema e identificar las acciones que podrán eliminar o reducir la ocurrencia de la falla potencial. **C.** Analizar la confiabilidad del sistema. **D.** Cuantificar riesgos y confiabilidad. **E.** Documentar el proceso.

Para realizar un FMEA es importante tener en cuenta los siguientes pasos: **Paso 1:** Selección del grupo de trabajo. **Paso2:** Establecer el tipo de AMFE a realizar, su objeto y límites. Se definirá de forma precisa el producto o parte del producto, el servicio o el proceso objeto de estudio. **Paso 3:** Explicar las funciones del producto o del proceso analizado. Es necesario un conocimiento exacto y completo de las funciones del objeto de estudio para identificar los Modos de Fallo Potenciales, o bien tener una experiencia previa del producto o proceso. **Paso 4:** Determinar los Modos Potenciales de Fallo. Para cada función definida en el paso anterior, hay que identificar todos los posibles Modos de Fallo. Esta identificación es un paso crítico y por ello se utilizarán todos los datos que puedan ayudar en la tarea. **Paso 5:** Determinar los Efectos Potenciales de Fallo. Para cada Modo Potencial de Fallo se identificarán todas las posibles consecuencias que éstos pueden implicar. **Paso 6:** Determinar las Causas Potenciales de Fallo. Para cada Modo de Fallo se identificarán todas las posibles Causas ya sean directas o indirectas. **Paso 7:** Identificar sistemas de control actuales. En este paso se buscarán los controles diseñados para prevenir las posibles Causas del Fallo, tanto los directos como los indirectos, o bien para detectar el Modo de Fallo resultante. **Paso 8:** Determinar los índices de evaluación para cada Modo de Fallo. Existen tres índices de evaluación: Índice de Gravedad (G), Índice de Ocurrencia

(O) Índice de Detección (D). **Paso 9:** Calcular para cada Modo de Fallo Potencial los Números de Prioridad de Riesgo (NPR) Para cada Causa Potencial, de cada uno de los Modos de Fallo Potenciales, se calculará el Número de Prioridad de Riesgo multiplicando los Índices de Gravedad (G), de Ocurrencia (O) y de Detección (D) correspondientes: **$NPR = G \cdot O \cdot D$** . **Paso 10:** Proponer Acciones de Mejora. Cuando se obtengan Números de Prioridad de Riesgo (NPR) elevados, deberán establecerse Acciones de Mejora para reducirlos. Se fijarán, así mismo, los responsables y la fecha límite para la implantación de dichas acciones.

2.2.2 Failure Mode and Effect Criticality Analysis - FMECA

Es una metodología de análisis de modos de falla, efectos y criticidad (FMECA o AMFEC) con objeto de identificar los modos de falla que representan un mayor riesgo, para posteriormente seleccionar la mejor tarea de mantenimiento, ya sea preventiva, predictiva, correctiva o acciones adicionales o complementarias. (Se define un modo de falla como la forma en la que un activo pierde su habilidad para desempeñar su función, entrando en el estado de falla, falla funcional).

El FMECA consiste en las siguientes etapas: **A.** Definición de la intención de diseño. **B.** Análisis funcional. **C.** Identificación de modos de falla. **D.** Efectos de la falla. **E.** Criticidad o jerarquización del riesgo. **F.** Recomendaciones.

Esto permite optimizar los recursos ya que la planeación del mantenimiento cambia, al ser ahora enfocada en los modos de falla derivados de un análisis funcional y no enfocada en los equipos, es decir, el plan es por modo de falla y no por equipo. La incorporación de criterios de riesgo y confiabilidad en la planeación del mantenimiento es una tendencia global, que requiere la incorporación no solo

de nuevas tecnologías en el proceso de mantenimiento sino en la planeación misma del mantenimiento.

2.2.3 Reliability Centered Maintenance - RCM

“Es un proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual”.⁷

Este proceso de análisis debe contar con personas expertas del sistema/activo (técnicos de mantenimiento y operadores), mandos medios de la organización (supervisores), representantes de fábrica del sistema o componente analizado, y un facilitador de la metodología RCM. También es necesario contar con información técnica, registro de fallas, registro de componentes y todo lo que se considere útil para el proceso.

Una vez reunidos los expertos, se desarrolla la metodología a través de las siguientes siete preguntas, las cuales se van registrando en un formato que arrojará información para aplicar el diagrama de decisión RCM y así obtener las posibles tareas de mantenimiento, o la estrategia de mantenimiento a implementar en la empresa.

Las siete preguntas acerca del activo o sistema que se intenta revisar son:

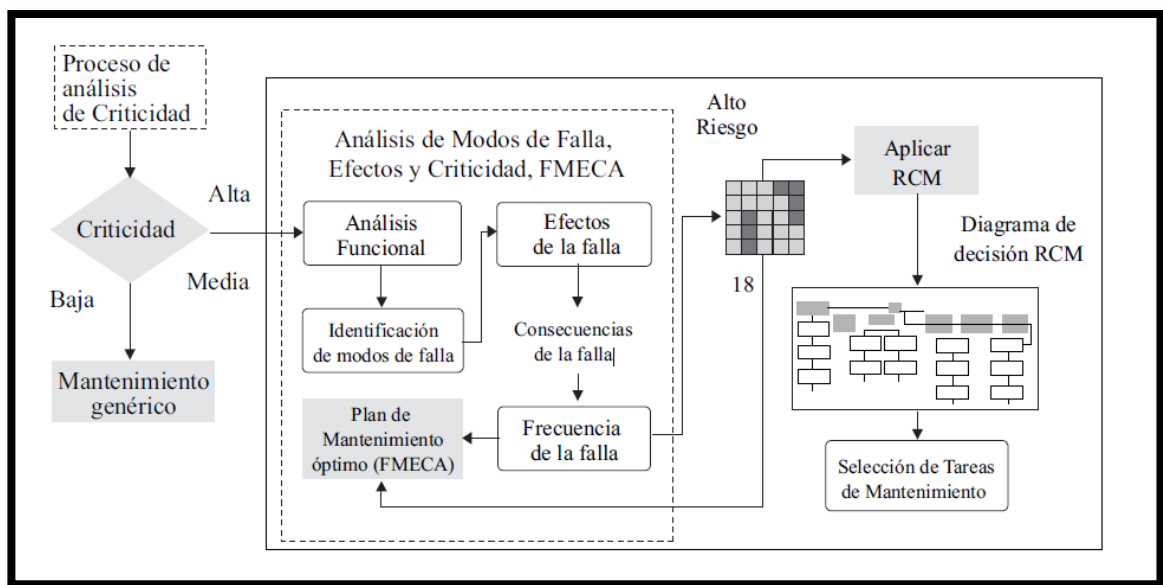
Pregunta 1: ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional? **Pregunta 2:** ¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones? **Pregunta 3:** ¿Cuál es la causa de cada falla funcional? **Pregunta 4:** ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla? **Pregunta 5:** ¿En qué sentido es importante cada falla? **Pregunta 6:** ¿Qué puede

⁷MOUBRAY, John. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (Reliability Centered Maintenance) Edición en Español.2004. Aladon LLC.

hacerse para prevenir o predecir cada falla? **Pregunta 7:** ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

A manera de resumen, en la figura 5 se presenta la relación entre los análisis modos de falla FMEA, FMECA y RCM descritos en esta sección, en la cual se evidencia que para hacer un RCM es necesario partir antes de un FMEA o FMECA y luego a través del diagrama de decisión RCM seleccionar tareas de mantenimiento.

Figura 5. Relación entre las metodología de análisis de modos de falla.



Fuente: Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad⁸

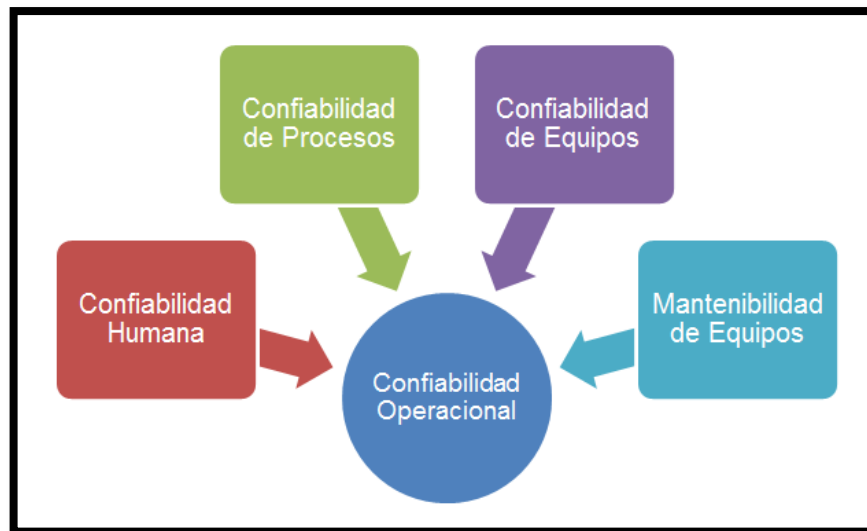
⁸AGUILAR, José, TORRES, Rocío Y MAGAÑA, Diana. Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. México. Tecnol. Ciencia Ed. (IMI) vol. 25 núm. 1. 2010. p 3.

2.3 CONFIABILIDAD OPERACIONAL

“La Confiabilidad Operacional se define como una serie de procesos de mejora continua que incorporan de forma sistemática avanzadas herramientas de diagnóstico, metodologías de análisis y nuevas tecnologías para optimizar la gestión, planeación, ejecución y control de la producción industrial.”⁹

La confiabilidad operacional está conformada por los siguientes factores: Confiabilidad humana, Confiabilidad de los procesos, Confiabilidad de equipos y Mantenibilidad de equipos. (Ver Figura 6).

Figura 6. Confiabilidad Operacional.



Fuente: Tomado de GARCIA⁹

⁹GARCIA, Oliverio. La Confiabilidad Humana en la Gestión de Mantenimiento. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2006.

También, se puede definir como la capacidad de una organización (procesos, tecnología, gente), para cumplir su función o el propósito que se espera de ella, dentro de sus límites de diseñar, calcular, conocer, y modificar (Incrementar) la probabilidad de completar con éxito una misión productiva y bajo un contexto operacional específico.

Para efectos de la presente investigación solo se tomará la confiabilidad humana como factor a detallar de la confiabilidad operacional.

2.3.1 Confiabilidad humana

A continuación se presentan algunas definiciones de la confiabilidad humana publicadas por expertos investigadores del tema.

“La Confiabilidad del talento humano se define como la probabilidad de desempeño eficiente y eficaz de todas las personas, en todos los procesos, sin cometer errores o fallas derivados del conocimiento y actuar humano, durante su competencia laboral, dentro de un entorno organizacional específico.”¹⁰

La confiabilidad humana, según documentos de la CE, se define como "el cuerpo de conocimientos que se refieren a la predicción, análisis y reducción del error humano, enfocándose sobre el papel de la persona en las operaciones de diseño, mantenimiento, uso y gestión de un sistema socio-técnico".¹¹

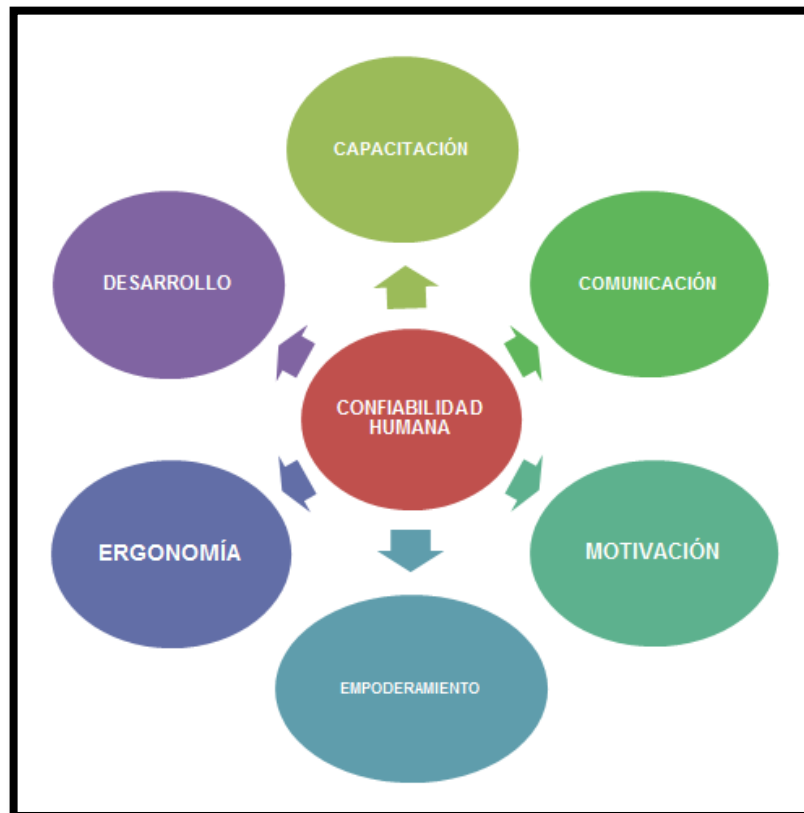
¹⁰GARCIA, Oliverio. La Confiabilidad Humana en la Gestión de Mantenimiento. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2006.

¹¹SEXTO, Luis. Análisis de Confiabilidad Humana (HRA). [Consultado 20-03-13] Disponible en <<http://se-gestiona.radical-management.com/2011/09/analisis-de-la-confiabilidad-humana-hra.html>>

La Confiabilidad Humana es la rama de la Ingeniería de Confiabilidad que permite identificar los efectos que las desviaciones de la acción humana; desde el punto de vista de seguridad, calidad, efectividad y eficiencia, tienen sobre los procesos productivos, con la finalidad de identificar las causas raíces que las producen y establecer las acciones que las eliminan, o mitiguen sus consecuencias.¹²

En la figura 7 se muestran los elementos que la componen.

Figura 7. Elementos de la confiabilidad humana.



Fuente: Tomado de: GARCIA, Oliverio. La Confiabilidad Humana en la Gestión de Mantenimiento. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2006.

¹²INTEGRAL ENGINEERING SOLUTIONS. [Consultado 14-04-13] Disponible en <http://iesca.venezuela.com/index.php?option=com_content&view=article&id=18&Itemid=23>

Cabe mencionar que uno de los principales factores de fallos en los equipos y plantas industriales, es el error humano, el cuál es consecuencia del no cumplimiento de algunos de los elementos de la confiabilidad humana que se mostraron en la figura 7. Muchos estudios lo han demostrado, pero la mayoría de veces estos fallos no son documentados, no son investigados, o en su defecto, no son publicados.

2.3.2 Error humano

El error humano tiene su origen desde la existencia del hombre. La imperfección es una de nuestras características y es lo que hace que la vida sea impredecible. Y de cierta manera es agradable, sería monótono el paso del hombre por la tierra de no ser por el error. Y así como el hombre evolucionó, el error ha hecho su parte y no en vano se dice que de los errores se aprende más que de los aciertos. Cuando ocurre una equivocación, es instintivo buscar la manera o el método para evitar que vuelva a suceder, y esto aplica para cualquier ámbito de la vida, no hace discriminación. Desde el hogar hasta el trabajo, desde el colegio hasta la universidad, en los deportes, en el arte, en el gobierno, en los hospitales, en la tecnología, etc. ¡Y cómo no! También en la industria.

Si se mira la evolución de los sistemas industriales, y sobre todo en el tema de la tecnología y de la automatización, se puede ver cómo se ha sustituido al operador humano en diferentes actividades. Sin embargo a pesar de los múltiples esfuerzos de la automatización, las personas siguen siendo el factor de enlace entre la máquina y el proceso por lo tanto el «Factor Humano» sigue siendo señalado como el responsable del 70% de los accidentes, un numero citado por diferentes autores de este tema.

En la industria se define el error humano como un acto que ocasiona o conduce una situación no deseada en el cumplimiento de una tarea específica, el acto que ocasiona un error puede ser en el diseño, instalación, operación, mantenimiento o administración de un sistema.

Según A.D Swain y H.E. Guttman¹³(1999) el error humano es una acción que excede los límites de aceptabilidad, es decir, los límites a los cuales se debe ajustar la actuación humana los cuales los define el sistema sobre el cual se actúa.

Entre los tipos de errores, REASON¹⁴ (1990), los determinó en tres grandes categorías: Los *Mistakes* o equivocaciones (acciones erróneas producto de una planificación incorrecta), *Lapsus* (omisiones u olvidos) y *Slips* o deslices (fallas en la ejecución motora de la acción).

Los *Lapsus* son errores asociados a fallas de la memoria, omisión de acciones o pasos en una secuencia de actividades, u olvidos. Usualmente son producto de situaciones de tensión, distracciones momentáneas, automatizaciones o procedimientos muy complejos con muchos pasos y diseños con bajo poder nemotécnico.

Los *Slips* son errores generados por fallas en la ejecución de la tarea. La planificación es correcta, pero se producen fallas en la acción producto de factores de atención. Estos son facilitados por problemas de diseño del sistema, patrones de diseño contra la lógica común o falta de mecanismos de retroalimentación adecuados. Usualmente los *Slips* son el resultado de una interacción entre las limitaciones humanas y los diseños que no toman en cuenta aquellas limitaciones.

¹³SWAIN A.D, GUTTMANN H.E. Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plants Applications. Albuquerque: Sandia National Laboratories. 1983.

¹⁴REASON, James. Human Error. New York: Cambridge University Press. 1990

Todos los seres humanos en mayor o menor grado están sujetos a cometer errores. “Es de humanos equivocarse”, es una frase muy frecuente que no debe volverse norma; los procesos de capacitación, entrenamiento y formación de habilidades técnicas, buscan minimizar los riesgos de errores humanos, y esto constituye uno de los objetivos primordiales de la Confiabilidad Humana.

Cuando se considera la interacción entre las personas y los sistemas productivos, los errores humanos se pueden clasificar en cuatro categorías así, según GARCÍA¹⁵ :

- *Errores por Factores Antropométricos*: son los relacionados con el tamaño y la resistencia física del operario que va a realizar una tarea, cuando no puede acomodarse físicamente a las condiciones del sistema o equipo; estos errores no constituyen la causa del problema, en la mayoría de los casos son el efecto de una falla del sistema que requiere una modificación o rediseño.
- *Errores por Factores Sensoriales*: Se relacionan con la pericia con que las personas usan los sentidos para ver lo que está ocurriendo en su entorno. Tiene que ver con aspectos como buena visibilidad o nivel de ruido, que requieren una acción correctiva para mitigarlos.
- *Errores por Factores Fisiológicos*: Se refieren a las tensiones medioambientales que afectan el desempeño humano, pues generan fatiga. Para reducirlos se deben efectuar cambios en el clima organizacional, o en los procesos a realizar. Entre ellos están: Cualquier enfermedad aunque sea leve, Medicamentos, Alteración de ritmos biológicos, Fatiga, Alcohol y drogas.

¹⁵GARCIA, Oliverio. La Confiabilidad Humana en la Gestión de Mantenimiento. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2006.

- *Errores por Factores Psicológicos:* Se refieren a los aspectos internos que tienen raíz en lo psíquico de las personas. Pueden generar errores intencionales o no intencionales y en la mayoría de los casos requieren de tratamiento especializado. Estos pueden ser: Conflictos emocionales, Estrés psicosocial, Experiencias previas similares, Motivación, Actitud y expectativa.

Los principales tipos de errores que se contemplan en los procesos industriales son: el desliz (*Slip*), debido a la falta de atención, los lapsos (*Lapsus*), debido a la falta de memoria, el engaño, como una respuesta impropia o la aplicación imprecisa de una regla, y la violación intencional de rutina o como un acto de sabotaje. El último grupo de errores son aquellos que se cometen por falta de conocimiento.

2.4 TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS DE LA CONFIABILIDAD HUMANA

Aunque las metodologías para el análisis del error humano datan de mediados de los años ochenta en la industria nuclear y petroquímica, es un tema que viene tomando fuerza en nuestra época. Una de las industrias que está adelantada en la aplicación de estas técnicas es la de la aviación. Debido a la criticidad que presentan los errores humanos y fallos de equipos en este campo, los hace exigirse e ir a la vanguardia de los análisis. También es posible encontrar documentación en aplicaciones médicas donde las consecuencias de los errores pueden terminar en la muerte de pacientes.

La Figura 8 presenta una comparación entre las técnicas para el análisis del error humano teniendo en cuenta sus ventajas y limitaciones para su aplicación. Entre las técnicas expuestas, se explicaran dos de las más importantes y conocidas: THERP y SHERPA.

Figura 8. Técnicas de confiabilidad humana.

Técnica	Ventajas	Limitaciones	Observaciones
ThERP	Estándar aceptado. Integrable en un análisis de probabilidades de riesgos. Amplia base de datos disponible.	Importante componente de subjetividad. Excesivo énfasis en los errores externamente observables. Difícil aplicación de los datos en tablas a situaciones distintas. No permite hacer recomendaciones de mejora para errores de diagnóstico.	Aplicable a todos los sectores industriales.
SHARP	Adaptable a la experiencia de los analistas. Buen tratamiento de las interacciones. Buena integración en el análisis probabilístico de riesgos.	Sólo la pueden aplicar expertos en la actividad analizada.	Marco útil para la integración de diversos métodos.
SHERPA	Utilización sencilla para no especialistas. Uso de modelos cognitivos. Orientado a la propuesta de recomendaciones.	Escaso tratamiento de los errores basados en conocimientos. Falta de madurez. Escasa integración en el análisis de probabilidades de riesgos. No considera los aspectos temporales. Excesiva subjetividad.	Se ha aplicado, tanto en sectores industriales, como en servicios.
Juicio de expertos	Sencillez de uso. Posibilidad de recoger información complementaria para proponer mejoras.	Posibilidad de sesgo por influencia de unos expertos en otros.	Aplicable a todo tipo de actividades simples. Imprescindible en ausencia de datos asimilables.
TRC	Considera el factor tiempo. Integrable como parte de cualquier otra técnica.		Aplicable a acciones post-accidente.
HRC	Aplicación del modelo cognitivo de Rasmussen.	No hay amplia aceptación sobre los parámetros aplicables. Pendiente de mayor desarrollo.	
SLIM	Orientado al tratamiento de los PSF. Flexible.	Poco validada. Desprecia las interrelaciones entre PSFs. Precisa de sofisticadas estimaciones de expertos.	
OAT	Técnica pionera en el tratamiento de errores de diagnosis y en el efecto temporal.	Integración poco clara en el análisis probabilístico de riesgos.	
HEART	Aplicación simple.	Aislamiento excesivo de las distintas tareas.	
INTENT	Especializada en errores de decisión.	Falta de madurez.	

Fuente: RUIZ-MORENO, Juan, y TRUJILLO, Humberto. Modelos para la evaluación del error humano en estudios de fiabilidad de sistemas. Murcia, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Murcia. Murcia (España) ISSN edición impresa: 0212-9728. ISSN edición web (<http://revistas.um.es/analesps>): 1695-2294. 2012.

2.4.1 Technique for Human Error Rate Prediction (ThERP)

El Análisis de Confiabilidad Humana (Human Reliability Analysis) es una técnica usada para identificar, analizar, cuantificar y documentar sistemáticamente los posibles modos de falla humanos dentro de un proyecto, y los efectos de las fallas sobre la confiabilidad global de los activos. La técnica cuantitativa de HRA más

ampliamente usada es la “Technique for Human Error Rate Prediction” (THERP), creada en Sandia National Laboratories, NM. USA.

“La hipótesis de base de THERP es que se puede considerar a la persona como fuente de fallos, de manera similar a un dispositivo técnico. Las tareas de la persona se descomponen en actividades elementales y su secuencia se visualiza en un *árbol de eventos*, juntamente con sus posibles desviaciones en forma de error de omisión o de comisión del operador. El evento básico que representa el error humano puede representarse como un subconjunto de nudos del árbol; de modo que para calcular su probabilidad basta multiplicar las probabilidades que se encuentran a lo largo del camino que conduce hacia él.”¹⁶

Los cinco pasos necesarios para aplicar el modelo THERP son:

- Definir las fallas del equipo
- Identificar las operaciones humanas relacionadas con cada falla de equipo
- Determinar las probabilidades de error humano asociadas
- Calcular los efectos de los errores humanos sobre la confiabilidad del equipo
- Recomendar los cambios básicos para optimizar el sistema hombre/máquina.

“La técnica THERP es ampliamente aceptada en diversos campos de actividad por su capacidad de integrarse en un análisis probabilístico de riesgos y ha influido en el desarrollo de otras técnicas de análisis; pero presenta dificultades, ya que es de aplicación muy laboriosa y los análisis tienen un componente de subjetividad importante, a causa de las múltiples elecciones de valores que se deben realizar en tablas de datos, de modo que frecuentemente no hay uniformidad entre distintos analistas en la identificación de errores y en los PSF (*Performance Shaping Factor*) a considerar”.¹⁶

¹⁶RUIZ-MORENO, Juan, y TRUJILLO, Humberto. Modelos para la evaluación del error humano en estudios de fiabilidad de sistemas. Murcia, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Murcia. Murcia (España) ISSN edición impresa: 0212-9728. ISSN edición web (<http://revistas.um.es/analesps>): 1695-2294. 2012

2.4.2 Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach (SHERPA)

Esta técnica fue desarrollada en 1986 por Embrey como una técnica de predicción de errores humanos, que permite analizar tareas o actividades y presentar soluciones a posibles errores de una forma estructurada. Es una de las técnicas de Identificación de Errores Humanos (HEI) más usadas, comprende una taxonomía de modos de error vinculados a una taxonomía de comportamiento y se aplica a un análisis de jerarquía de tareas del objeto, equipo o escenario de estudio para predecir errores humanos potenciales o errores de diseño inducidos.

A pesar de haber sido desarrollado para uso en procesos de industria, el SHERPA es genérico y puede aplicarse en cualquier dominio que involucre la actividad humana.

A continuación se describen los pasos para la Aplicación del método SHERPA:

- Paso 1. Análisis jerárquico de tareas. (HTA – *Hierarchical Task Analysis*). El primer paso de un análisis SHERPA requiere una descripción de las tareas o escenario bajo análisis. Para este propósito, por lo general se desarrolla un HTA de las tareas o escenario bajo análisis. El método SHERPA trabaja indicando cuales de los errores de la taxonomía de errores del SHERPA son creíbles en cada paso de tareas de nivel inferior de las tareas bajo análisis.
- Paso 2. Clasificación de las tareas. Cada una de las operaciones desde el nivel inferior de los análisis se tiene en consideración y se clasifica desde la taxonomía de errores en uno de los tipos siguientes: Acción (*Action*), Verificación (*Checking*), Recuperación (*Retrieval*), Comunicación (*Communication*), Selección (*Selection*). (Ver tabla 1).

- Paso 3. Identificación del Error Humano (HEI - *Human Error Identification*). La identificación de cada paso de actividad, lleva al analista a considerar los modos de error creíbles asociados con una actividad utilizando la taxonomía descrita en paso 2. Para cada error creíble se presenta una descripción de la forma en que se produciría el error. Ver tabla 1.

Tabla 1. Taxonomía y modos de error SHERPA

SHERPA ERROR MODES		
ERROR TYPE	CODE	ERROR MODE
ACTION ERRORS	A1	Operation too long/short
	A2	Operation mistimed
	A3	Operation in wrong direction
	A4	Operation too little/much
	A5	Misalign
	A6	Right operation on wrong object
	A7	Wrong operation on right object
	A8	Operation omitted
	A9	Operation incomplete
	A10	Wrong operation on wrong object
CHECKING ERRORS	C1	Check omitted
	C2	Check incomplete
	C3	Right check on wrong object
	C4	Wrong check on right object
	C5	Check mistimed
	C6	Wrong check on wrong object
RETRIEVAL ERRORS	R1	Information not obtained
	R2	Wrong information obtained
	R3	Information retrieval incomplete
COMMUNICATION ERRORS	I1	Information not communicated
	I2	Wrong information communicated
	I3	Information communication incomplete
SELECTION ERRORS	S1	Selection omitted
	S2	Wrong selection made

Fuente: LANE, Rhonda; STANTON, Neville; HARRISON, David. *Hierarchical Task Analysis to Medication Administration Errors*. Brunel University.

- Paso 4. Análisis de las consecuencias. Considerando la consecuencia de cada error en un sistema, un siguiente paso esencial es qué implicaciones tiene la consecuencia en la criticidad del error. El analista deberá describir totalmente las consecuencias asociadas con el error identificado.
- Paso 5. Análisis de recuperación. El analista debe determinar el potencial de recuperación del error identificado. Si hay una tarea posterior en la cual el error puede recuperarse se introducirá “siguiente” en la tabla de datos, de lo contrario se escribirá “ninguna”.
- Paso 6. Análisis de probabilidad ordinal. Una vez que la consecuencia y el potencial de recuperación se han identificado, el analista debe estimar la probabilidad de ocurrencia del error. Para lo cual se introduce un valor ordinal de probabilidad que puede ser bajo, medio o alto. Si el error nunca ha ocurrido entonces se asignará una probabilidad baja o L (Low). Si el error ha ocurrido en ocasiones anteriores se asignará la probabilidad media o M (Medium). Y por último si el error ocurre frecuentemente, se asignará una probabilidad alta o H (High). Esto puede soportarse en datos históricos o en el conocimiento de alguien experto en la materia.
- Paso 7. Análisis de criticidad. Con este paso se identifican aquellos errores con consecuencias que se consideran críticas; por ejemplo si se causarían pérdidas inaceptables. La identificación de la criticidad se realiza en forma binaria. Típicamente una consecuencia crítica sería una que puede ocasionar un daño sustancial al equipo, planta o producto y/o lesiones al personal.
- Paso 8. Análisis remedial. La parte final en este proceso es proponer o recomendar estrategias de reducción de errores. Estas se presentan en forma de cambios propuestos al sistema de trabajo que podrían prevenir la

ocurrencia de errores, o por lo menos reducir las consecuencias en caso de que ocurran. Esto se puede hacer por medio de una lluvia de ideas para proponer maneras de evitar el error o reducir los efectos del error. Típicamente estas estrategias pueden categorizarse en cuatro clases: A) Equipos (por ejemplo rediseños o modificaciones de equipos existentes). B) Entrenamiento (por ejemplo cambios o implementación de programas de formación y entrenamiento). C) Procedimientos (Elaboración de nuevos procedimientos, o rediseño y revisión de los viejos procedimientos). D) Organizacional (Cambios en políticas organizacionales o cultura).

Algunos de estas acciones remediales pueden ser costosas de implementar. Por lo tanto deben revisarse a la luz de las consecuencias, criticidad y probabilidad de ocurrencia del error. Cada recomendación debe analizarse con respecto a cuatro criterios: Prevención del error o falla, Eficacia, Efectividad de costo y aceptación de usuarios y practicidad.¹⁷.

En la tabla 2 se puede observar un ejemplo de cómo se presenta el resultado del análisis de confiabilidad humana utilizando la técnica SHERPA.

¹⁷SALMON, P, STANTON, Neville, WALKER, G. Human Factor Methods: A practical guide for Engineering and Design. Ashgate Publishing Company.2005.p 15 - 22.

Tabla 2. Ejemplo resultado SHERPA

SHERPA Output – Human Error Analysis Table

Task Step	Error Mode	Description	Consequence	Recovery	P	C	Remedial measures
1.1.1	C1	Fail to check patient bed area	Chart not found - drug doses missed	1.1.2	L	M	Tagging system for location of charts
	C2	Carry out an in-complete check at patient bed	Chart not found - drug doses missed	1.1.2	L	M	Tagging system for location of charts
1.1.2	C1	Fail to check nurse station	Chart not found - drug doses missed	1.1.3	M	M	A tagging system for location of charts
	C2	Carry out an in-complete check of nurse station	Chart not found - drug doses missed	1.1.3	M	M	Tagging system for location of charts
1.1.3	C1	Fail to check doctor's desk	Chart not found - drug doses missed	1.1.4	M	M	A tagging system for location of charts
	C2	Carry out incomplete check of doctor's desk	Chart not found - drug doses missed	1.1.4	M	M	A tagging system for location of charts
1.1.4	R2	Given false information about the chart location due to mix up in patient names	Drug doses missed	1.1.5	L	M	System should track patient information through departments
1.1.5	A6	Start new chart for wrong patient	Drug doses missed or wrong treatment regime initiated		L	M	Formal chart reviews
	A8	Fail to start new chart	Doses missed leading to deterioration of patient condition		L	L	Local alert system for mislaid/lost charts or tagging system
1.2.1	R2	Read drug name incorrectly	Selection of wrong drug for administration	Check before administering 2.5.1.1	H	H	Indicate the patient condition the drug is prescribed for
1.2.2	R2	Read drug dose incorrectly	Administration of overdose or dose of no therapeutic value	2.5.1.2	H	H	Only use standard abbreviations or write words in full. Computerised order entry.

Fuente: LANE, Rhonda; STANTON, Neville y HARRISON, David. Hierarchical Task Analysis to Medication Administration Errors. Brunel University.

Don Harris y Neville A. Stanton en el paper *“Using SHERPA to predict design-induced error on the flight deck”*¹⁸ (2003) califican a SHERPA como la mejor herramienta disponible para la identificación y predicción del error humano. En este estudio se quiere evidenciar los errores de diseño de la cabina de control del piloto y cómo esto provoca errores humanos en tareas tan importantes como preparar el avión para el aterrizaje. A través de encuestas (46) realizadas a pilotos obtuvieron una lista de 57 errores posibles relacionados con la tarea mencionada. Al realizar el análisis jerárquico de tareas (HTA) y aplicando la metodología SHERPA arrojó la identificación de 52 errores, valor bastante aproximado al de las encuestas. Con la tabulación de los resultados y las sugerencias establecidas dieron como exitoso el estudio a través de SHERPA y menciona que será útil continuar realizando este tipo de estudios en el futuro con miras a identificar errores implícitos de diseño.

Rhonda Lane, Neville A Stanton y David Harrison de Brunel University, en el paper *“Hierarchical Task Analysis to Medication Administration Errors”*¹⁹ demuestran cómo SHERPA puede aplicarse a la identificación del error humano en la administración de medicamentos a los pacientes de un hospital. El propósito es identificar en qué parte del proceso ocurren la mayoría de errores de esta tarea que se considera de alto riesgo y proponer soluciones para mitigar las consecuencias de los errores.

SHERPA resulta adecuada para tareas en las que la actividad humana está en el nivel de funcionamiento basado en habilidades (automatismos) o en la aplicación de reglas. Sin embargo, los errores que se producen en el nivel de conocimientos son poco predecibles, por eso se recomienda aplicarla junto con cualquier otra,

¹⁸HARRIS, Don. STANTON, Neville A. MARSHALL, Andrew. YOUNG, Mark S. DEMAGALSKI, Jason. SALMON, Paul. “Using SHERPA to predict design-induced error on the flight deck”. Cranfield University. Brunel University. Marshall Ergonomics Ltd. 2003

¹⁹LANE, Rhonda. STANTON, Neville. HARRISON, David. Hierarchical Task Analysis to Medication Administration Errors. Brunel University. .

como método alternativo al uso de tablas para la estimación de probabilidades de error humano. Se recurre a ella cuando, para conocer la probabilidad de error, hay que considerar la influencia de muchos factores interdependientes que afectan a la respuesta de la persona; también se emplea cuando en las bases de datos no se encuentra puntos de referencia aplicables. Combina las aproximaciones analíticas y los métodos de estimación subjetiva de probabilidades desarrollados conforme a las reglas de la teoría de la decisión.

En el campo de la minería no hay aplicaciones conocidas, sin embargo, en los diferentes documentos consultados se hace la anotación que la técnica SHERPA puede ser usada en cualquier sector. Con base en esto está abierta la posibilidad de encontrar resultados satisfactorios aplicándola al mantenimiento de equipo minero, hacia donde tiende la presente investigación.

3 RECOLECCIÓN & TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1 CAMIÓN ELÉCTRICO HITACHI EH5000

El camión Hitachi EH5000 es un equipo minero de gran escala, su peso neto está alrededor de 214 toneladas y puede llegar a cargar hasta 320 toneladas de material. Mide aproximadamente de alto 7 metros, de largo 14 metros y de ancho 8 metros. Cuenta con un motor MTU Detroit Diesel con una potencia de 2600 HP que unido al alternador genera la energía eléctrica necesaria para que un sistema de control de potencia eléctrico SIEMENS permita el movimiento de las ruedas motorizadas (traseras) y así realizar la tracción del equipo.

Figura 9. Camión Hitachi EH5000

**Engineered for Performance,
Designed for Comfort,
and Built to Last.**

Hitachi EH5000 is designed with the same reliability as Hitachi's world leading Hydraulic Excavators.

AC Drive Proven Performance & Economic Advantages
Hitachi adopted Siemens AC drives make your hauler a more valuable asset. In your mining operation, better performance, higher availability, and significant reductions in maintenance and operating costs - result in a lower cost per tonne and a higher return on your investment.

High-Powered Engine
The MTU Detroit Diesel 16V Series 4000 engine with 2 014 kW and 10 830 N.m torque provides excellent reliability and unparalleled fuel efficiency.

Long Frame Life
A fabricated box section and rectangular frame rail construction provides superior resistance to bending and torsional loads. One-piece top and bottom flanges eliminate cross tie member tie-in joints and provide a larger exposed center area for access to major components. There are no castings in the frame assembly.

Tough Body
The Hitachi horizontal stiffener design minimizes stress concentrations, by dispersing load shocks over the entire body length. Closely spaced stiffeners provide additional protection by minimizing distances between unsupported areas.

Well Matched: EH5000 & Excavators

Parameter	EH5000		EX300LC		EX300LC-6	
Front	LD	SD	LD	SD	LD	SD
Bucket	21.0 m ³ (26.0 cu yd)	20.0 m ³ (26.0 cu yd)	1.53 m ³ (2.00 cu yd)	1.53 m ³ (2.00 cu yd)	1.53 m ³ (2.00 cu yd)	1.53 m ³ (2.00 cu yd)
Payload	320 t	320 t	4.0 t	4.0 t	4.0 t	4.0 t

Note: The bucket height depends on the option.

LD: Loading Drum SD: Scoop

Fuente: Hitachi. EH5000. Tokyo. Hitachi Construction Machinery Co., Ltd.

En Cerrejón los camiones eléctricos están asignados a las tareas de cargue, transporte y disposición de material estéril dentro del proceso productivo del carbón, en el que las palas que están ubicadas en los diferentes tajos de

explotación cargan los camiones que llegan a alimentarse de ellas; una vez cargados, los camiones hacen el recorrido determinado para llegar a un botadero donde descargan el material estéril. (El estéril es un material que no contiene el mineral objeto de explotación pero que es necesario remover antes de llegar a la capa de carbón). Estos camiones son los de mayor capacidad de cargue en La Mina, por eso los usan en esta tarea porque pueden acarrear mayor cantidad de BCM y así cumplir las metas de producción propuestas para el año.

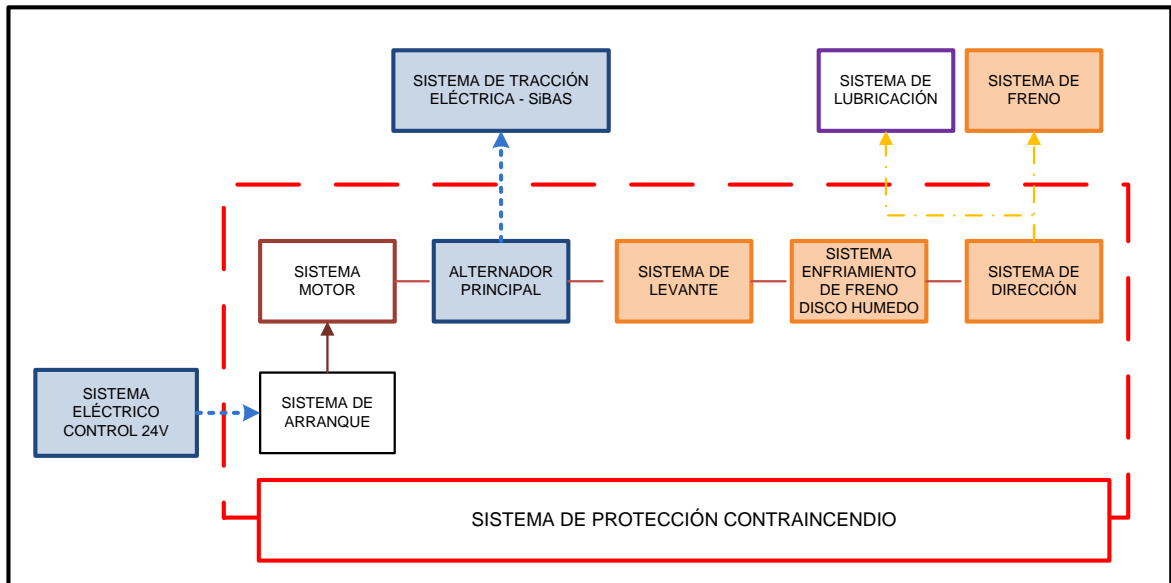
3.1.1 Funcionamiento General

El camión Hitachi EH5000 está compuesto por los siguientes sistemas: Eléctrico de Control 24V, Arranque, Motor, Tracción Eléctrica, Dirección, Freno, Levante, Lubricación y Protección Contra Incendio. Se hará una descripción breve de estos sistemas y sus relaciones (Ver figura 10).

El sistema de control eléctrico de 24V es el cerebro que recibe las señales de los sensores ubicados en el equipo y según las entradas, procesa los datos y envía las respectivas salidas según los valores de referencia que tiene guardados en la memoria. Si las condiciones para el arranque están dadas, entonces al momento de poner la llave en START, las baterías le envían la corriente al Sistema de Arranque que hace girar la volanta del motor diésel y al vencer la inercia, el motor enciende.

Acoplado al motor está el alternador principal el cual genera la corriente alterna que pasa por el panel rectificador y que tiene una salida de alrededor 2500VDC que sirven al Sistema de Tracción Eléctrica SiBAS para alimentar las ruedas motorizadas (motores AC) y permitir que el camión se mueva según lo indica la palanca direccional ((F) Forward, (N) Neutral, (R) Reverse).

Figura 10. Bloque Funcional Camión EH5000



Fuente: Autores

Además del alternador, hay tres bombas hidráulicas acopladas al motor diésel a través de un eje cardan. La primera, la bomba de levante, la segunda de enfriamiento de freno trasero húmedo, y la tercera, la bomba de dirección. Ésta última es la encargada de generar el flujo hidráulico necesario para la dirección, para la aplicación de freno y señales piloto para el sistema de levante y de lubricación. (El sistema de dirección es el tema objeto de la presente investigación y se detallara en la sección 3.5 del presente documento).

El Sistema de Levante es la encargado de generar el flujo hidráulico para que la tolva haga los ciclos de subida y bajada durante la operación de cargue y descargue del equipo. El Sistema de Enfriamiento de Freno de Disco Húmedo es el encargado de generar el flujo hidráulico para enfriar el paquete de frenos traseros durante la función de freno de cargue y descargue.

El Sistema de Freno es el encargado de realizar la aplicación de freno de servicio y de parqueo cuando el operador así lo requiera según las condiciones de operación.

El sistema de lubricación es controlado electrónicamente y accionado por un motor hidráulico el cual esta acoplado a una bomba que genera un flujo de grasa que permite lubricar las articulaciones del equipo y evitar el desgaste prematuro de los componentes.

El Sistema de Protección contra incendio tiene un cable sensor que mide la temperatura en la zona de motor y de las bombas hidráulicas y si es mayor a 180°C activa automáticamente la salida de Polvo Químico Seco hacia los puntos calientes y de ésta manera sofocar el oxígeno que alimenta el incendio.

3.2 DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL

Cerrejón cuenta con un sistema de información ERP (*Enterprise Resource Planning*) por medio del cual se estructura la base de datos para todos los departamentos de la compañía. En el departamento de mantenimiento se usa para el registro de horas de operación de equipos, fallas, repuestos, componentes, órdenes de trabajo, almacenamiento, compras, costos, entre otros, etc.

Acompañado del sistema de información, se tiene la estrategia de mantenimiento que está basada en RCM, por lo tanto las decisiones de gestión se toman con respecto a los indicadores de confiabilidad y disponibilidad. Para su cumplimiento, en la flota de camiones eléctricos EH5000 se tienen dos frentes de trabajo: Mantenimiento Preventivo y Mantenimiento Correctivo.

El mantenimiento preventivo se guía por el registro de las horas de operación de los equipos. Con base en esto se programa la ejecución de las tareas de mantenimiento periódico diseñadas bajo la metodología RCM. Se tiene como meta realizar dos (2) PM (Mantenimiento Preventivo) por cada turno de 12 horas de trabajo para cumplir con una disponibilidad de 84,1%.

Paralelo al mantenimiento preventivo, hay un departamento encargado de realizar las inspecciones para realizar análisis predictivos como: aceites, vibraciones y daños estructurales, etc. Una vez obtenidos los resultados, los envían a los analistas de la flota quienes toman las decisiones y asignan tareas de mantenimiento específicas para dar solución a las condiciones críticas encontradas en los análisis. El resultado de todo esto es un formato con una lista de tareas a realizar clasificadas por sistemas de operación en el camión; los técnicos ejecutan las tareas y firma quien la realizó. Después que el equipo sale de mantenimiento, se revisa que el formato este diligenciado y se procede a cerrar la orden de trabajo relacionada en el ERP.

Para el mantenimiento correctivo, se cuenta con una interacción vía radio entre producción y mantenimiento donde se informa el estado actual de falla de cada equipo. El objetivo es reparar las fallas imprevistas que se presentan a lo largo del turno de trabajo y de esta manera aportar para el cumplimiento de la meta de disponibilidad de 84,1%.

El proceso para la atención de los mantenimientos correctivos se hace de la siguiente manera: El operador del equipo reporta la falla a través del sistema de despacho (CTD) que tiene en la cabina (Pantalla táctil), introduciendo un código relacionado con el evento. Esta información llega a la base de comunicaciones de producción y ésta a su vez lo comunica a la base de mantenimiento. El sistema de información registra el fallo del equipo y genera automáticamente una orden de trabajo (OT).

La persona en la base de mantenimiento clasifica la falla según una jerarquía de sistemas creada con base en el análisis RCM, esto alimenta una base de datos de reporte de fallas con lo que se hacen informes mensuales de indicadores de gestión de mantenimiento. Una vez hace esto, a través de radio reporta la falla del equipo y su ubicación al personal técnico que se encuentra en el sector donde operan los camiones. Los técnicos van a atender el equipo, hacen el diagnóstico de la falla y su respectiva reparación. Una vez el equipo está disponible nuevamente, los técnicos lo comunican a la persona en la base de mantenimiento, quien cierra la OT y lo comunica a la base de producción para que el equipo pueda entrar en operación de nuevo. En dado caso que la reparación de la falla no pueda hacerse en campo, el equipo debe llevarse a taller.

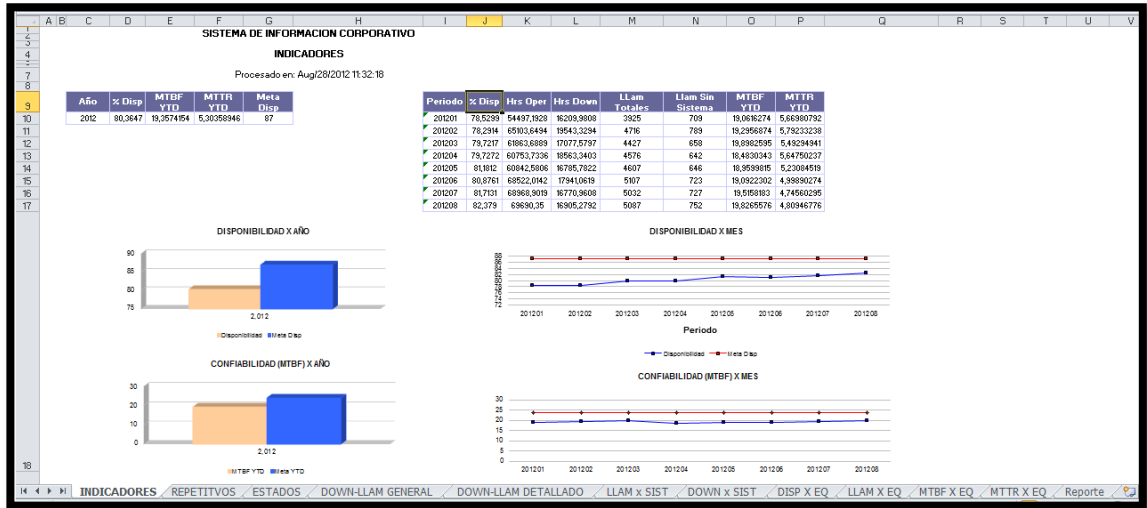
3.3 OBTENCIÓN DE DATOS

El proceso de recolección de datos, se realizó a través de diferentes medios. Se entrevistaron técnicos, supervisores y coordinadores de área, arrojando información acerca de la experiencia de la ejecución de tareas, del diagnóstico de fallas, de los reportes de confiabilidad de la flota y de las decisiones administrativas y logísticas.

También se obtuvo información de los Indicadores de Operación a través de la base de datos del ERP. Este es un reporte mensual en Excel en el que se resume la disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad tanto por equipo como por sistema. A continuación se detallan las pestañas de las que se analizaron los datos. La figura 11 muestra un pantallazo del reporte mensual.

La pestaña INDICADORES (Figura 11) muestra la Disponibilidad, Confiabilidad, Tiempo medio para reparar (MTTR), Llamados por mes, Horas de operación y Horas down de los equipos.

Figura 11. Pantallazo reporte mensual Indicadores de Operación



Fuente: Indicadores de Operación Agosto 2012. xlsx

La pestaña REPETITIVOS (Figura 12) muestra una matriz que relaciona el número del equipo (ej. 022-714) con el número de fallas por sistema que ha presentado durante el mes. El número de llamados es crítico (rojo) cuando el camión supera 15 reportes en el mes de los diferentes sistemas.

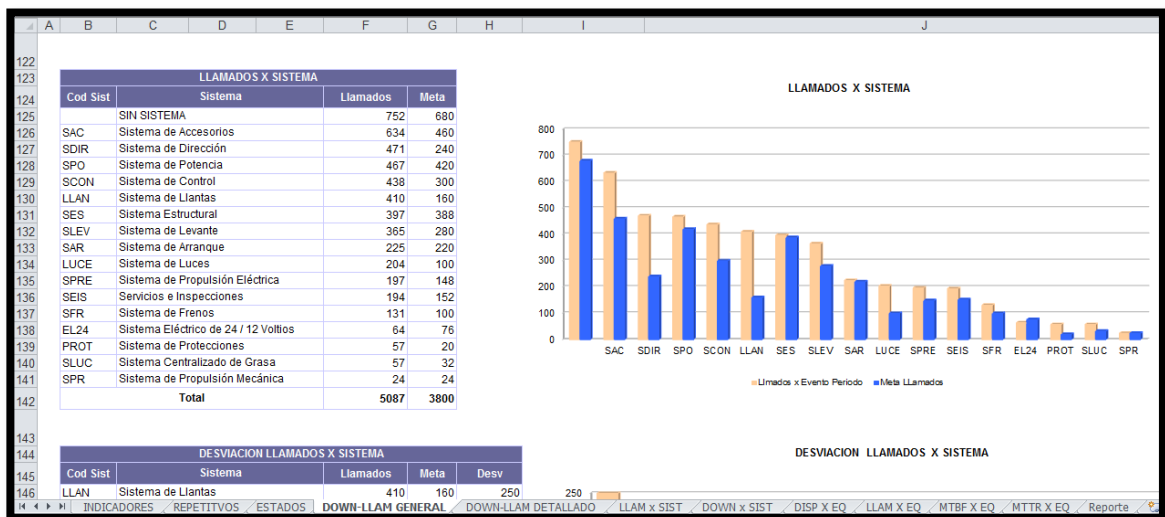
La pestaña DOWN-LLAM GENERAL muestra el número de llamadas por fallas que se registran por cada sistema del camión en todos los equipos de la flota durante el mes (Figura 13).

Figura 12. Indicadores de Operación –pestaña REPETITIVOS

SISTEMA DE INFORMACION CORPORATIVO									
LLAMADOS X SISTEMA									
Procesado en: Aug/28/2012 11:32:18									
	Servicios e Inspecciones	SIN SISTEMA	Sistema Centralizado de Grasa	Sistema de Accesorios	Sistema de Arranque	Sistema de Control	Sistema de Dirección	# LLAMADAS	
121	0220714	1	2	4	5	1	1	22	
122	0220723	2	4	3	3	1	5	39	
123	0220737	2	4		3	1	5	31	
124	0220753	2	5		5		1	24	
125	0220758	1	3	1	5	2		30	
126	0220769	2	3		5			25	
127	0220802	1	4		3		2	29	
128	0220816	2	3		5		2	25	
129	0220828	2	5	1	3		5	20	
130	0220706	2	3		4	1	4	25	
131	0220739	1	4		1	1		18	
132	0220744	1	2		2	3	4	25	
133	0220768	1	2	1	3	1	4	23	
134	0220818	2	3		4		1	21	
135	0220820	2	4		1	1	3	19	
136	0220730	2	2		1		1	13	
137	0220824	2	2	2	1		2	18	
138	0220831	1	2	1	2		3	15	
139	#Llamados	194	752	57	634	225	438	471	5087

Fuente: Indicadores de Operación Agosto 2012. xlsx

Figura 13. Indicadores de Operación – pestaña DOWN-LLAM GENERAL



Fuente: Indicadores de Operación Agosto 2012. xlsx

La pestaña Reporte registra toda la información de las fallas (Figura 14). Muestra el número del equipo (Ej. 022-744), Fecha en que ocurrió la falla, el Periodo (mes), El código CTD (el que ingresa el operador desde la pantalla táctil que tiene en la cabina), el turno en el que ocurrió la falla (Diurno – Nocturno), Hora de inicio de la falla, Hora Fin de la falla, Demora en Horas de la falla, Orden de trabajo, Descripción de la Orden de Trabajo, Código de componente según jerarquía RCM, Código Sistema según jerarquía RCM y la última columna queda disponible para comentarios acerca de la falla, diagnóstico o reparación de la misma.

Figura 14. Indicadores de Operación – pestaña Reporte

Nº	Flota	Equip	Fecha	Perioc	Codigo	Turn	Hora Ini	Hora F	D Hor	Horas Operac	Work Ord	Descripcion WorkOrder	Comp Co	Cod Sis	Descripcion Sistema	Comentarios
21	EH5000	0220717	28 Jul 2012	201208	009	N	03:24	03:37	0.22	63690,35	EVD68888	BAJO NIVEL ACETITE DIR/COMPLETAR NIVEL	CDIR	SDIR	SISTEMA DE DIRECCION	
24	EH5000	0220719	28 Jul 2012	201208	024	N	04:41	05:23	0.7	63690,35	EVD68915	NEUTRALIZADO/COMPLETAR NIVEL DE DIR	CDIR	SDIR	SISTEMA DE DIRECCION	
41	EH5000	0220734	28 Jul 2012	201208	001	N	03:40	03:59	0.32	63690,35	EVD68894	FUGA HDCA/COMPLETO NIVEL DIR/LEY	CDIR	SDIR	SISTEMA DE DIRECCION	
68	EH5000	0220752	28 Jul 2012	201208	009	N	21:36	21:51	0.25	63690,35	EVD68781	BAJO NIVEL ACETITE DIR/COMPLETAR NIVEL	CDIR	SDIR	SISTEMA DE DIRECCION	
74	EH5000	0220755	28 Jul 2012	201208	009	N	21:12	21:55	0.72	63690,35	EVD68768	BAJO NIVEL ACETITE DIR/COMPLETAR NIVEL	CDIR	SDIR	SISTEMA DE DIRECCION	
76	EH5000	0220756	28 Jul 2012	201208	009	D	07:54	08:11	0.28	63690,35	EVD68469	COMPLETAR ACETITE DIRECCION	CDIR	SDIR	SISTEMA DE DIRECCION	Que encontro al hacer el diagnostico de la falla?
108	EH5000	0220783	28 Jul 2012	201208	095	D	06:00	09:18	3.3	63690,35	EVD68443	CALIBRAR STAMBY DIRECCION	CDIR	SDIR	SISTEMA DE DIRECCION	Que encontro al hacer el diagnostico de la falla?
109	EH5000	0220783	28 Jul 2012	201208	095	D	14:40	16:37	1.95	63690,35	EVD68638	CALIBRAR PRESION STAMBY DIRECCION	CDIR	SDIR	SISTEMA DE DIRECCION	Que encontro al hacer el diagnostico de la falla?
116	EH5000	0220789	28 Jul 2012	201208	700	D	14:47	15:09	0.37	63690,35	EVD68642	COMPLETAR ACETITE DIRECCION	CDIR	SDIR	SISTEMA DE DIRECCION	Que encontro al hacer el diagnostico de la falla?
124	EH5000	0220795	28 Jul 2012	201208	005	N	18:14	20:42	2.47	63690,35	EVD68691	FUGA HDCA/CAMBIO MANGUERA LARGA C/DI/DI	CDIR	SDIR	SISTEMA DE DIRECCION	
126	EH5000	0220796	28 Jul 2012	201208	024	N	03:31	03:59	0.47	63690,35	EVD68890	BAJO NIVEL ACETITE DIR/COMPLETAR NIVEL	CDIR	SDIR	SISTEMA DE DIRECCION	
132	EH5000	0220798	28 Jul 2012	201208	001	D	17:01	18:00	0.98	63690,35	EVD68677	FUGA HDCA/CAMBIO MANGUERA BOMBA DIR	CDIR	SDIR	SISTEMA DE DIRECCION	
133	EH5000	0220798	28 Jul 2012	201208	001	N	18:00	00:00	6	63690,35	EVD68677	FUGA HDCA/CAMBIO MANGUERA BOMBA DIR	CDIR	SDIR	SISTEMA DE DIRECCION	
135	EH5000	0220799	28 Jul 2012	201208	001	N	20:23	20:58	0.58	63690,35	EVD68751	FUGA TK-HDCA/COMPLETO NIVEL DIR	CDIR	SDIR	SISTEMA DE DIRECCION	
138	EH5000	0220801	28 Jul 2012	201208	009	D	08:00	08:14	0.23	63690,35	EVD68491	COMPLETAR NIVELES DE DIRECCION	CDIR	SDIR	SISTEMA DE DIRECCION	Que encontro al hacer el diagnostico de la falla?

Fuente: Indicadores de Operación Agosto 2012. xlsx

Otra fuente de información fueron formatos, instructivos y procedimientos de ejecución de tareas (Formato de PM de 750, 1500 y 3000 horas (Ver Figura 15) y Procedimiento de montaje de la válvula orbitrol).

Figura 15. Formato de PM 750 HORAS – RUTA INSPECCIÓN

CORREJÓN		SISTEMA DE INTEGRIDAD OPERACIONAL Y CALIDAD - CERREJÓN	FORMATO - CAMION EH5000 SEIS DE 750 HORAS	Código: FD-MAA-SH02 Versión 54, Fecha 2011 / 12 / 19
INSPECCION Y SERVICIO DE 750 HORAS				
EQUIPO:	O.T.:	KE	FECHA:	A1 A2
RUTA DE INSPECCIÓN – EN HANGAR				
Tiempo: de 1.0 a 1.5 Horas				
DESCRIPCION DE LA TAREA	OK	RP	PR	TECNICO
Revisar condición física de los 2 acumuladores de dirección y frenos				
Revisar por fugas en parte interior del housing (túnel)				
Revisar las suspensiones 1, 2, 3 y 4 por golpes y fisuras				
Verificar que testigo de los múltiples de admisión estén destapados				
Inspeccionar condición física de los discos delanteros y espesor de las pastillas de los frenos delanteros (Referencia de espesor: ¼")				
Revisar condición de aislamiento eje cardan por golpes, grietas o roturas				
Revisar que los 4 wiggins auxiliares de llenado para aceite hidráulico (debajo de la caja de wiggins principal) tengan los 4 tapones y sellos protectores				
Verificar que wiggins de combustible en el tanque tenga su tapa protectora.				
Inspeccionar en motor: zona fan clutch, mangueras y racores de aceite, y tuberías de combustible de alta y baja por fugas – corregir si aplica				
Inspeccionar mangueras del radiador por fugas				
Inspeccionar por roturas el soporte del ventilador				
Revisar ajuste de tensores de los ductos de escape y admisión				
Revisar condiciones físicas y tensión de correas motor y alternador de carga				
Revisar por falla funcional el tensor y soporte del alternador carga y polea tensora				
Revisar estado de mangueras y fittings del sistema de refrigeración				
Revisar soportes del motor (grietas, soldaduras) y estado de platos metálicos				
Verificar que no hallan tornillos partidos en la tapa del intercooler				
Revisar respiraderos del motor				
Inspeccionar visualmente estado de los ductos y tapa del túnel				
Prueba articulaciones: girar dirección y chequear juego en:				
Barra antivuelco				
Pines de la tolva				
Nose cone				
Inspeccionar guarda del Eje Cardan.				
Revisar estado/fugas de los cilindros de dirección, líneas y conexiones				
Medir y revisar estado de shines del eje frontal. (Referencia: 1"). Si es mayor, inspeccionar bujes de bronce laterales del eje frontal.				
Revisar condición física/fugas de la v/v amplificadora, líneas y conexiones				
Inspeccionar tornillos que fijan cabezal de filtros hidráulicos de alta a la base				
Revisar condición física/fugas de la v/v orbitrol, líneas y conexiones				
Inspeccionar enrutamiento de manguera de presión del pedal de freno				
Revisar líneas y conexiones sistema de enfriamiento de frenos por fugas				
Verificar funcionamiento de la alarma bajo nivel de grasa				
Revisar estado de mangueras de lubricación de turbos				
Verificar correcto estado de mangueras azules de salida del turbo al post-enfriador. Nota: En caso de roturas, deformaciones o decolorados en alguna zona, cambiarlas. (s/c mangueras: 2757318 - s/c abrazaderas: 2756617).				
Verificar que el torque de las mangueras azules del turbo sea 21Nm +/- 2Nm.				
Verificar correcto estado y torque de las abrazaderas metálicas de anclaje del caracol del turbo a 21Nm +/- 2Nm.				
Nota: IMPORTANTE Asegurar una correcta alineación de todos los turbos.				

Fuente: Intranet Cerrejón

También se consultaron manuales técnicos de fabricante que explican el funcionamiento de los sistemas, la descripción de los componentes, montaje y desmontaje de componentes, planos hidráulicos y electrónicos, entre otros.

Por último, se revisó el documento final del análisis RCM del camión eléctrico EH5000 realizado por Cerrejón y bajo el cual está desarrollada la estrategia de mantenimiento de la compañía.

3.4 ANÁLISIS DE DATOS

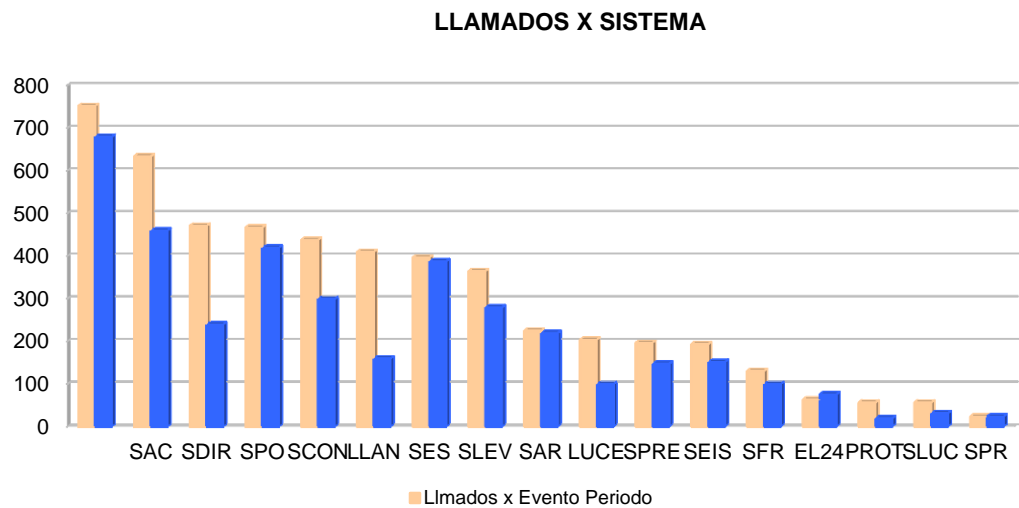
Con la información obtenida de la pestaña *DOWN-LLAM GENERAL* (figura 16) del documento de Excel: *Indicadores de Operación* de los meses agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre de 2012, enero y marzo de 2013, se identificó el sistema crítico del camión.

Para esto, se estableció la desviación de la meta de cada sistema en cada mes, con lo cual se pudo demostrar que el sistema de dirección evidencia un aumento considerable en el número de llamados por falla, lo cual hace que se sobrepase la meta máxima planeada, que para el 2012 fue de 240 llamados/mes y para el 2013 subió a 300 llamados/mes. Los valores por encima de éstos, afectan la disponibilidad del equipo y la confiabilidad del sistema.

Bajo este criterio de análisis, en la tabla 3, se indica que el sistema de dirección es el que presenta mayor desviación de la meta durante el periodo de tiempo estudiado, permitiendo concluir que es un sistema con baja confiabilidad y baja disponibilidad; razones por la cuales se convierte en el sistema objeto de estudio del presente trabajo.

Figura 16. Indicadores de Operación: DOWN-LLAM GENERAL

LLAMADOS X SISTEMA			
Cod Sist	Sistema	Llamados	Meta
	SIN SISTEMA	752	680
SAC	Sistema de Accesorios	634	460
SDIR	Sistema de Dirección	471	240
SPO	Sistema de Potencia	467	420
SCON	Sistema de Control	438	300
LLAN	Sistema de Llantas	410	160
SES	Sistema Estructural	397	388
SLEV	Sistema de Levante	365	280
SAR	Sistema de Arranque	225	220
LUCE	Sistema de Luces	204	100
SPRE	Sistema de Propulsión Eléctrica	197	148
SEIS	Servicios e Inspecciones	194	152
SFR	Sistema de Frenos	131	100
EL24	Sistema Eléctrico de 24 / 12 Voltios	64	76
PROT	Sistema de Protecciones	57	20
SLUC	Sistema Centralizado de Grasa	57	32
SPR	Sistema de Propulsión Mecánica	24	24
Total		5087	3800



Fuente: Indicadores de Operación Agosto 2012. xlsx

Tabla 3. Numero de llamados equivalentes a fallas de todos los sistemas del camión

Cod Sist	Sistema	Meta 2012	ago-12	DESV	sep-12	DESV	oct-12	DESV	nov-12	DESV	dic-12	DESV	Meta 2013	ene-13	DESV	mar-13	DESV
	SIN SISTEMA	680	752	-72	693	-13	658	22	611	69	712	-32	688	560	128	321	367
SAC	Sistema de Accesorios	460	634	-174	657	-197	587	-127	700	-240	768	-308	532	628	-96	397	135
SDIR	Sistema de Dirección	240	471	-231	551	-311	506	-266	648	-408	728	-488	300	534	-234	279	21
SPO	Sistema de Potencia	420	467	-47	508	-88	405	15	469	-49	452	-32	424	344	80	292	132
SCON	Sistema de Control	300	438	-138	468	-168	403	-103	454	-154	567	-267	328	416	-88	250	78
SES	Sistema Estructural	388	397	-9	442	-54	414	-26	479	-91	578	-190	356	481	-125	177	179
SLEV	Sistema de Levante	280	365	-85	341	-61	396	-116	339	-59	473	-193	292	326	-34	147	145
LLAN	Sistema de Llantas	160	410	-250	330	-170	343	-183	367	-207	412	-252	304	269	35	148	156
SPRE	Sistema de Propulsión Eléctrica	148	197	-49	209	-61	145	3	158	-10	182	-34	144	141	3	70	74
LUCE	Sistema de Luces	100	204	-104	189	-89	149	-49	191	-91	222	-122	116	132	-16	96	20
SFR	Sistema de Frenos	100	131	-31	185	-85	201	-101	195	-95	165	-65	100	116	-16	95	5
SEIS	Servicios e Inspecciones	152	194	-42	175	-23	150	2	181	-29	181	-29	176	160	16	94	82
SAR	Sistema de Arranque	220	225	-5	161	59	204	16	190	30	251	-31	220	176	44	154	66
EL24	Sistema Eléctrico de 24 / 12 Voltios	76	64	12	71	5	86	-10	72	4	75	1	72	76	-4	46	26
SLUC	Sistema Centralizado de Grasa	32	57	-25	47	-15	26	6	47	-15	49	-17	48	38	10	25	23
PROT	Sistema de Protecciones	20	57	-37	33	-13	21	-1	22	-2	20	0	24	20	4	20	4
SPR	Sistema de Propulsión Mecánica	24	24	0	14	10	28	-4	14	10	18	6	20	7	13	12	8
Total		3800	5087		5074		4722		5137		5853		4144	4424		2623	

Fuente: Autores

Una vez identificado el sistema de dirección como objeto de estudio, se procedió a identificar las fallas del sistema en los equipos de la flota, con ayuda del documento Indicadores de Operación en la pestaña *Reporte*. Con este registro se detallaron las fallas a nivel de componente y se estableció su ocurrencia durante cada uno de los meses anteriormente mencionados. El resultado se muestra a continuación en la tabla 4.

Tabla 4. Componente/ Número de fallas por mes

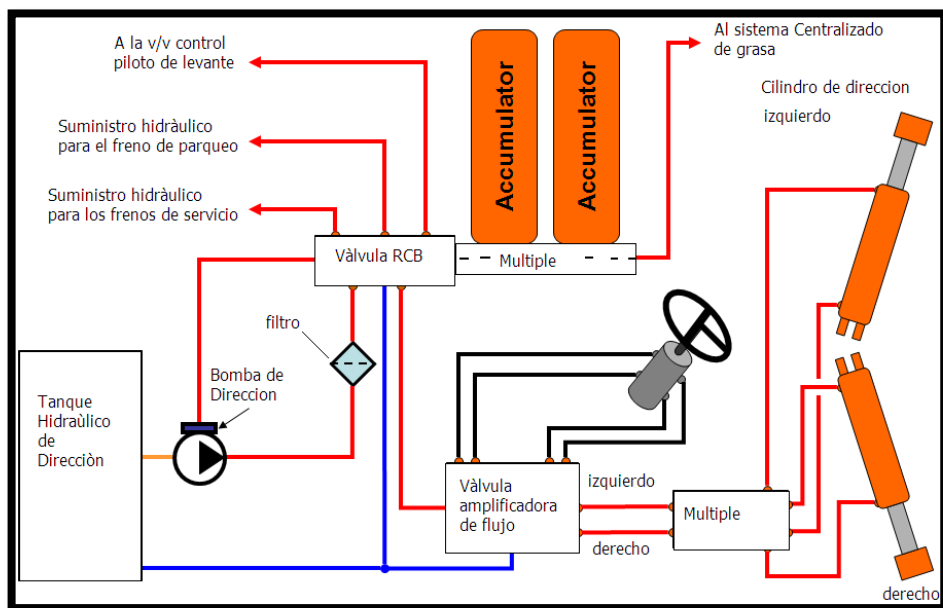
COMPONENTE	MES // No. de fallas por componente							
	AGO '12	SEPT '12	OCT '12	NOV '12	DICE '12	ENE '13	ABR '13	
Manguera	25	57	52	61	65	74	52	
Tanque	8	6	3	3	8	4	4	
Temperatura	18	33	16	32	21	15	23	
Nivel	310	346	321	372	420	271	259	
Bomba	1	5	1	4	5	3	6	
Compensadora	39	40	31	38	60	66	48	
Manguera	3	1	4	1	1	0	8	
Filtro	6	3	1	4	4	3	3	
Tubo Cabezal	4	7	0	4	5	0	5	
V/V RCB	0	2	0	1	7	0	1	
Sello Check	5	0	0	1	2	0	0	
Trasductor Presión	31	26	29	37	42	24	11	
Alivio Secundario	0	1	6	1	0	2	2	
Solenoides descarga	1	0	0	0	0	0	0	
Manguera	9	4	2	8	10	1	8	
Acumulador	9	9	15	16	18	30	15	
Transductor presión	0	1	0	2	0	0	0	
Amplificadora	2	0	3	0	0	0	2	
Manguera	3	0	0	4	6	2	2	
Columna Dir	1	2	2	5	1	3	3	
Orbtírol	5	6	15	39	24	9	13	
Manguera	0	1	2	3	3	2	3	
Sellos	1	3	3	0	0	0	0	
Cilindros	4	3	8	6	4	7	2	
Manguera	11	13	5	4	14	6	6	
Sellos	0	0	1	2	2	0	0	
Fallos Totales del Sistema	496	569	520	648	722	522	476	

Fuente: Autores

3.5 SISTEMA DE DIRECCIÓN CAMIÓN EH5000

El Sistema de dirección de los camiones EH5000 es totalmente hidráulico, de centro cerrado, e independiente de los demás sistemas hidráulicos del camión. En la figura 17 se muestra el diagrama de bloque funcional del sistema en el que indica cómo opera la dirección en el camión y la relación entre sus componentes.

Figura 17. Diagrama de bloques Sistema de Dirección EH5000



Fuente: Hitachi. EH5000. Tokyo. Hitachi Construction Machinery Co., Ltd.

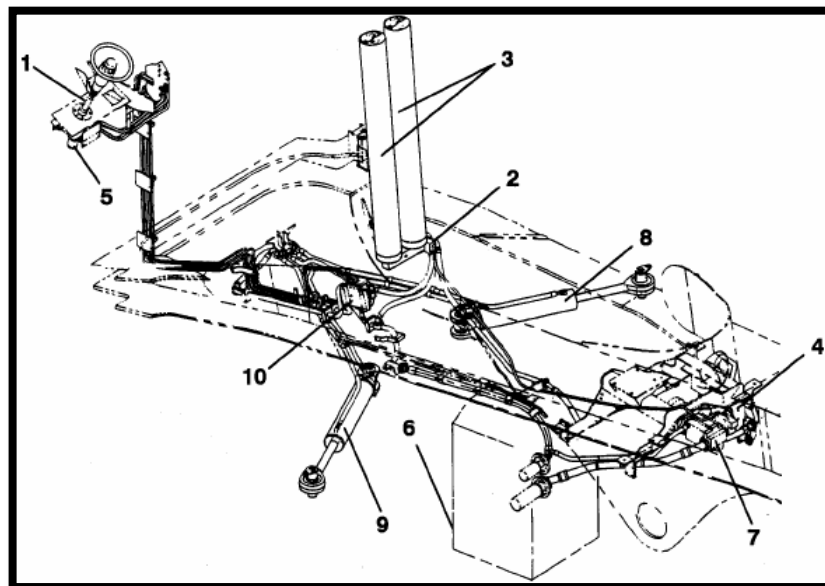
El funcionamiento del sistema de dirección empieza cuando la bomba succiona el aceite desde el tanque hidráulico y empieza a generar caudal hasta alcanzar una presión de 3000 psi en las líneas. El flujo generado por la bomba llega a la válvula RCB después de pasar por un filtro de alta presión. La RCB es un múltiple distribuidor del aceite para permitir la operación de otros sistemas en el camión. En lo que se refiere al sistema de dirección, la RCB permite cargar los acumuladores y enviar alimentación hidráulica a la válvula amplificadora de flujo.

Luego, la válvula amplificadora de flujo le envía presión hidráulica (P) a la válvula “orbitrol” para que cuando se mueva el volante, según el sentido de giro, regresa la línea de presión al puerto L (Left- Izquierda) o R (Right – Derecha) de la válvula amplificadora y ésta mueva los cartuchos internos para que el flujo llegue a los cilindros y permite el giro según el movimiento del volante.

3.5.1 Descripción de componentes Sistema de Dirección

En la figura 18 se pueden identificar los componentes del sistema numerados así:
1) Columna de dirección. 2) Válvula RCB (Reliefe, Check, Bleeding). 3) Acumuladores de dirección. 4) Filtro de dirección. 5) Válvula control de la dirección “orbitrol”. 6) Tanque de dirección. 7) Bomba de dirección. 8) Cilindro de dirección derecho. 9) Cilindro de dirección izquierdo. 10) Válvula amplificadora de flujo.

Figura 18. Componentes del Sistema de Dirección



Fuente: HITACHI. Technical Manual EH5000ACII Rigid Dump Truck. Guelph: Hitachi Construction Truck Manufacturing, 2009.

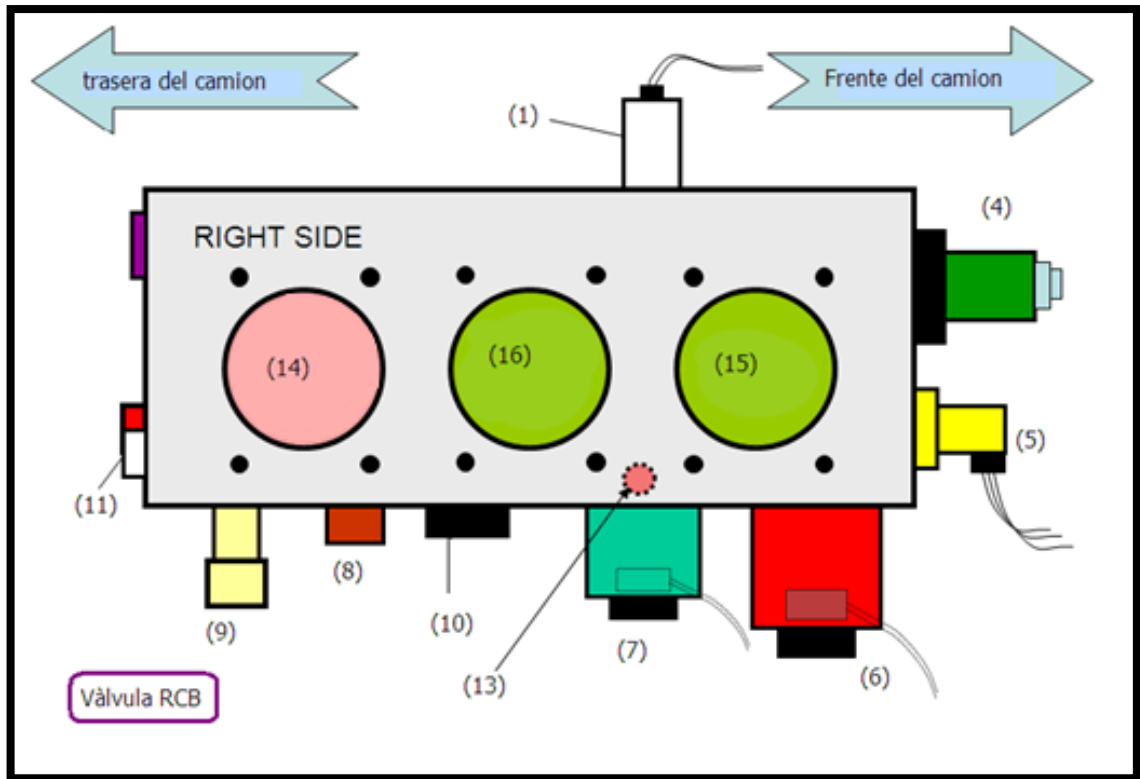
3.5.1.1 Columna de dirección

Está ubicada en la cabina del operador (Figura 18 (1)), es la que comanda movimiento de la dirección del camión. En la parte superior tiene el volante que es el elemento a través del cual el operador maniobra el equipo, y en la parte inferior ensambla con la válvula control de la dirección “Orbitrol” (Figura 18 (5)).

3.5.1.2 VÁLVULA RCB – Relief – Check - Bleed.

La Válvula RCB (Figura 18(2)) está montada en la base de los acumuladores de dirección. Es un múltiple donde llega la manguera de flujo hidráulico principal que viene de la bomba de dirección (Figura 19 (14)), y del cual se distribuye a los sistemas hidráulicos que dependen de él. Tiene incorporados los siguientes componentes según la figura 19: **Transductor de presión de freno/dirección:** (5) Es el que mide como está la presión del sistema de dirección y envía esta señal al sistema de control de 24V para el monitoreo de condiciones de trabajo. **Válvula Check:** Está instalada para separar la línea de suministro de la bomba de dirección de la línea de carga de los acumuladores. **Válvula de alivio secundario** (4) Esta calibrada a 3200 (+/- 25) PSI a un flujo de 151 L/min (40 GPM). **Solenoides de descarga de los acumuladores de dirección** (6) Se energiza cuando el switch de ignición está en la posición OFF, entonces, el sistema se descarga en 90 segundos aproximadamente. **Fusible de Velocidad** (8) Es usado para proteger el sistema de dirección de posibles fallas o fugas entre la RCB y la bomba del Sistema Centralizado de Grasa. Es cerrada y se abre a tanque hidráulico si el flujo se incrementa por encima de 19 L/min (5 GPM).

Figura 19. Válvula RCB y sus componentes

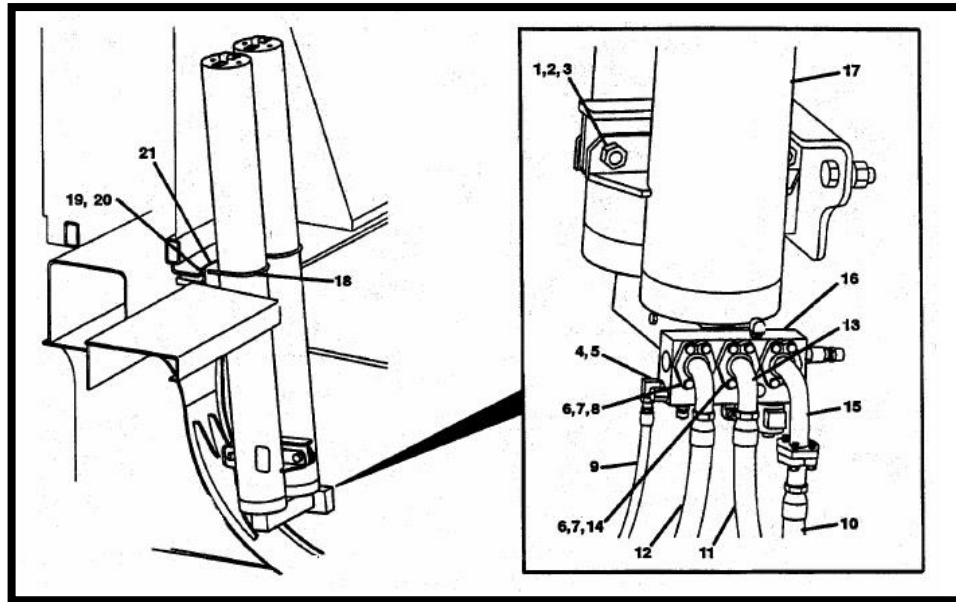


Fuente: HITACHI. Technical Manual EH5000ACII Rigid Dump Truck. Guelph: Hitachi Construction Truck Manufacturing, 2009.

3.5.1.3 Acumuladores de dirección

Almacenan un volumen suficiente de aceite a presión y su función es proporcionar al sistema este flujo en caso que se presente una falla. Si se cae la presión del sistema, el acumulador compensa de manera rápida esta caída de presión. El acumulador tiene internamente un pistón que se desplaza libremente y separa la precarga de nitrógeno (1200 PSI), del aceite a presión del sistema. Este aceite es devuelto a tanque cuando la llave de la ignición está en OFF, a través del solenoide de descarga de los acumuladores.

Figura 20. Acumuladores de dirección



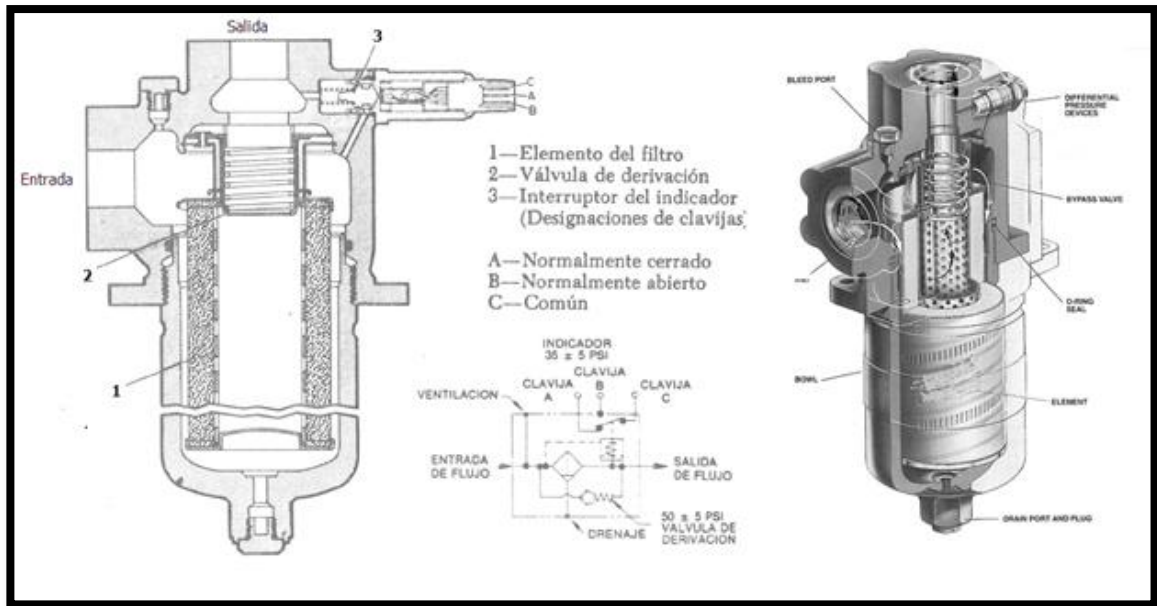
Fuente: HITACHI. Workshop Manual EH5000ACII Rigid Dump Truck. Guelph: Hitachi Truck Manufacturing, 2008.

3.5.1.4 Filtro de alta presión

En operación normal el fluido de la dirección es dirigido desde la bomba de la dirección hasta la lumbrera de entrada, al interior, el elemento filtrante tiene una capacidad de retención de partículas de 6 micrones y entonces sale por el elemento del filtro hacia la lumbrera de salida.

Si se obstruye el elemento del filtro o si el fluido está extremadamente viscoso y la presión en la entrada del filtro alcanza una presión de 50 PSI, la válvula de derivación abre un pasaje directamente a la lumbrera de salida. Esto permitirá que el fluido sin filtrar salga por el filtro de alta presión.

Figura 21. Filtro hidráulico de alta presión



Fuente: HITACHI. Workshop Manual EH5000ACII Rigid Dump Truck. Guelph: Hitachi Truck Manufacturing, 2008

3.5.1.5 Válvula Control de la Dirección “Orbitrol”

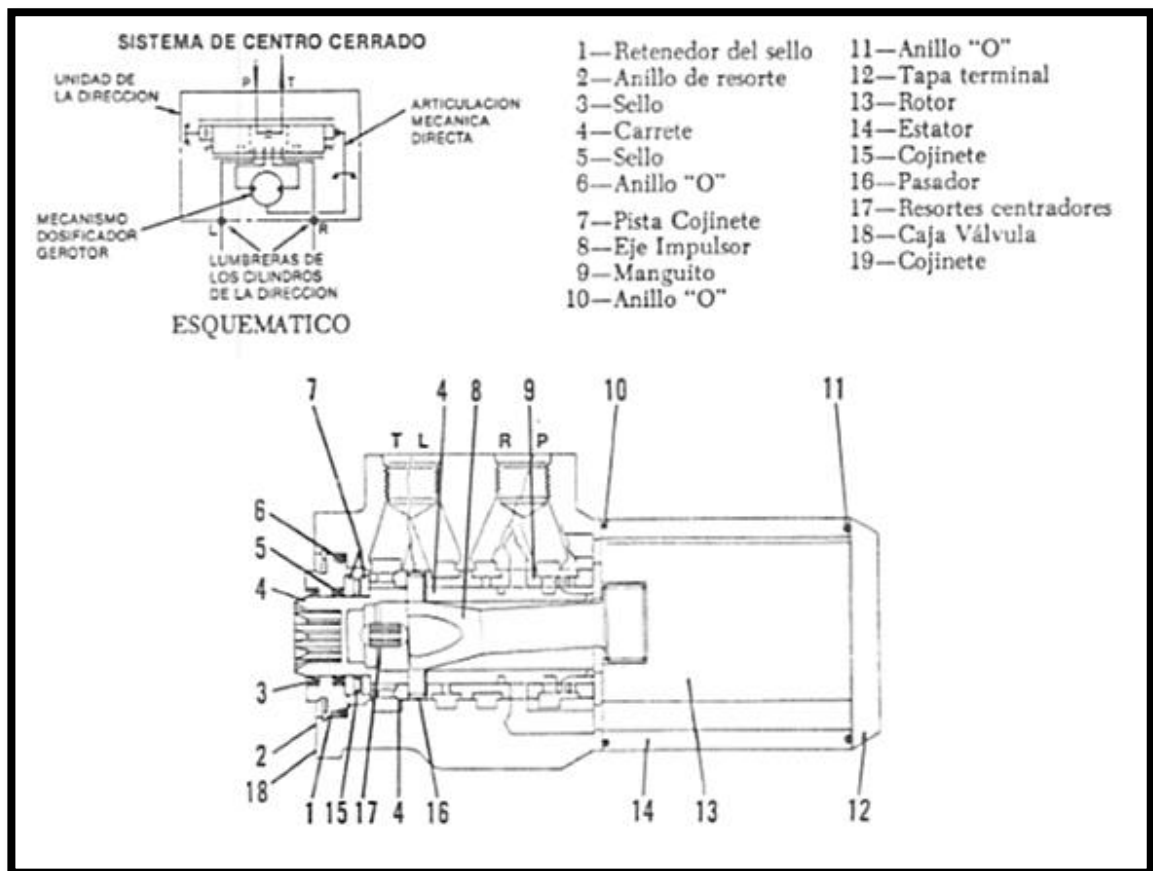
Los números en paréntesis corresponden a la figura 22. La válvula de la dirección “Orbitrol” controla el sentido del flujo del aceite en el sistema, reaccionando directamente al movimiento del volante de la dirección. La válvula consta de dos secciones principales, una de control y otra de dosificación.

La sección más grande es un dispositivo dosificador que controla la cantidad de aceite entregado por la válvula. Consta del estator (14) y del rotor (13). El estator (14) va empernado a la caja de la válvula (18) y contiene 7 lóbulos o cámaras de desplazamiento.

El rotor (13) tiene seis dientes, los cuales entran en contacto con el estator (14) el cual está engranado al eje impulsor del gerotor (8), y por tanto directamente

controlado por el volante de dirección. La caja de la válvula (14) contiene 14 orificios, siete de ellos para los pernos, los otros siete están alineados con los lóbulos en el estator (14) y sirven de lumbreras de conexión del estator a la caja de válvulas (18).

Figura 22. Válvula ORBITROL



Fuente: HITACHI. Workshop Manual EH5000ACII Rigid Dump Truck. Guelph: Hitachi Truck Manufacturing, 2008

Cuando el volante de la dirección y el eje impulsor (8) coinciden en cierta dirección, el movimiento orbital de la línea central del gerotor está en dirección opuesta.

El eje impulsor (8) está acoplado al carrete de la válvula (4) y manguito de la válvula (9) con un pasador centrado (4) en una ranura maquinada. La tensión de los resortes (17) actúa contra el manguito (9) durante la rotación lo que alinea los orificios en el carrete y el manguito, lo que hace que actúen como un solo conjunto. El carrete de la válvula tiene canales que coinciden con las lumbreras en el manguito de la válvula para que ésta pueda suministrar el control de fluido direccional deseado.

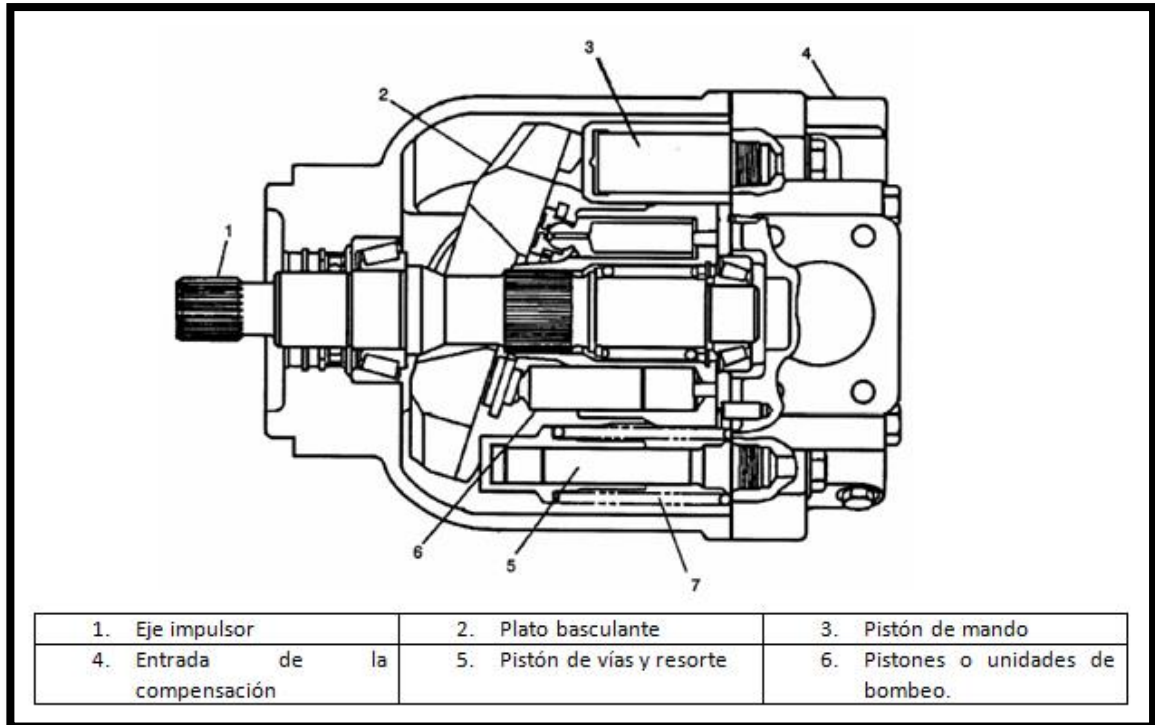
3.5.1.6 Tanque hidráulico

Está dividido en dos secciones, una para el aceite de levante y enfriamiento de frenos y otra con para el sistema de dirección-frenos con capacidad de 61 galones.

3.5.1.7 Bomba de dirección

La bomba de dirección es del tipo de pistones axiales en línea; es decir, el eje y el bloque de cilindros están en la misma línea central y los nueve pistones se mueven en la misma dirección que la línea central del bloque de cilindros. El desplazamiento de la bomba es positivo y variable. Utiliza una compensación de presión integral que regula la longitud del recorrido de cada pistón y así controla el caudal de la bomba, reduciendo o aumentando la entrega dependiendo de los requerimientos del sistema. En la figura 23 se muestran los componentes internos de la bomba de dirección.

Figura 23. Bomba de dirección



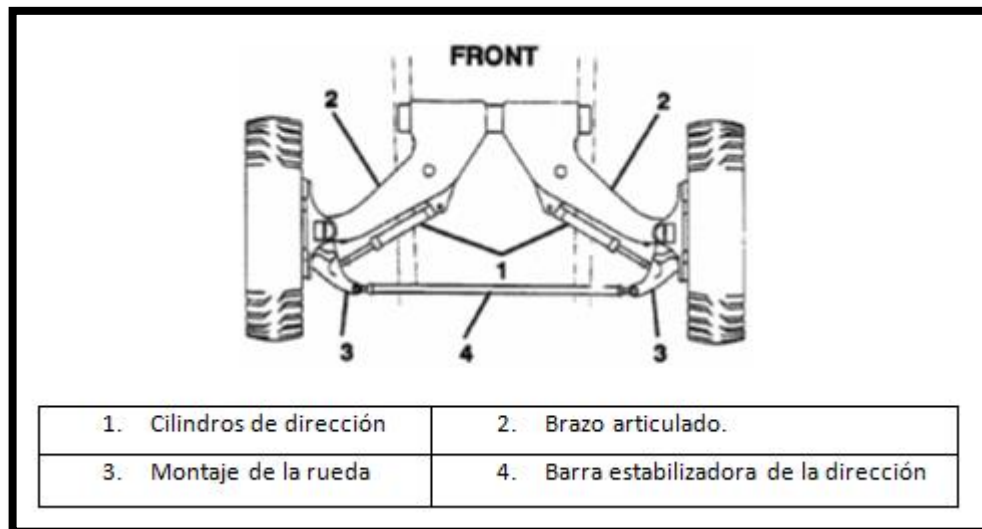
Fuente: HITACHI. Workshop Manual EH5000ACII Rigid Dump Truck. Guelph: Hitachi Truck Manufacturing, 2008

3.5.1.8 Cilindros de dirección

Según la figura 24, los cilindros de dirección (1) son de doble efecto y etapa simple, accionados hidráulicamente por el sistema de dirección para girar las ruedas delanteras (3). Los extremos de la base del cilindro de dirección están sujetos a los brazos articulados (2) del vehículo y los extremos del vástago de los cilindros están sujetos a los husos de las ruedas delanteras (3). Al girar el volante de la dirección, el aceite hidráulico es dirigido hacia los cilindros de la dirección por la válvula control de la dirección "Orbitrol". La operación de la válvula dirige el aceite a las lumbreras opuestas de cada cilindro de dirección, extendiendo el vástago del pistón de un cilindro y retrayendo el otro. El movimiento de los vástagos de los pistones es transferido a los husos (3) que hacen girar las ruedas

delanteras. La barra estabilizadora de la dirección (4) mantiene las ruedas girando acorde.

Figura 24. Montaje Cilindros de dirección



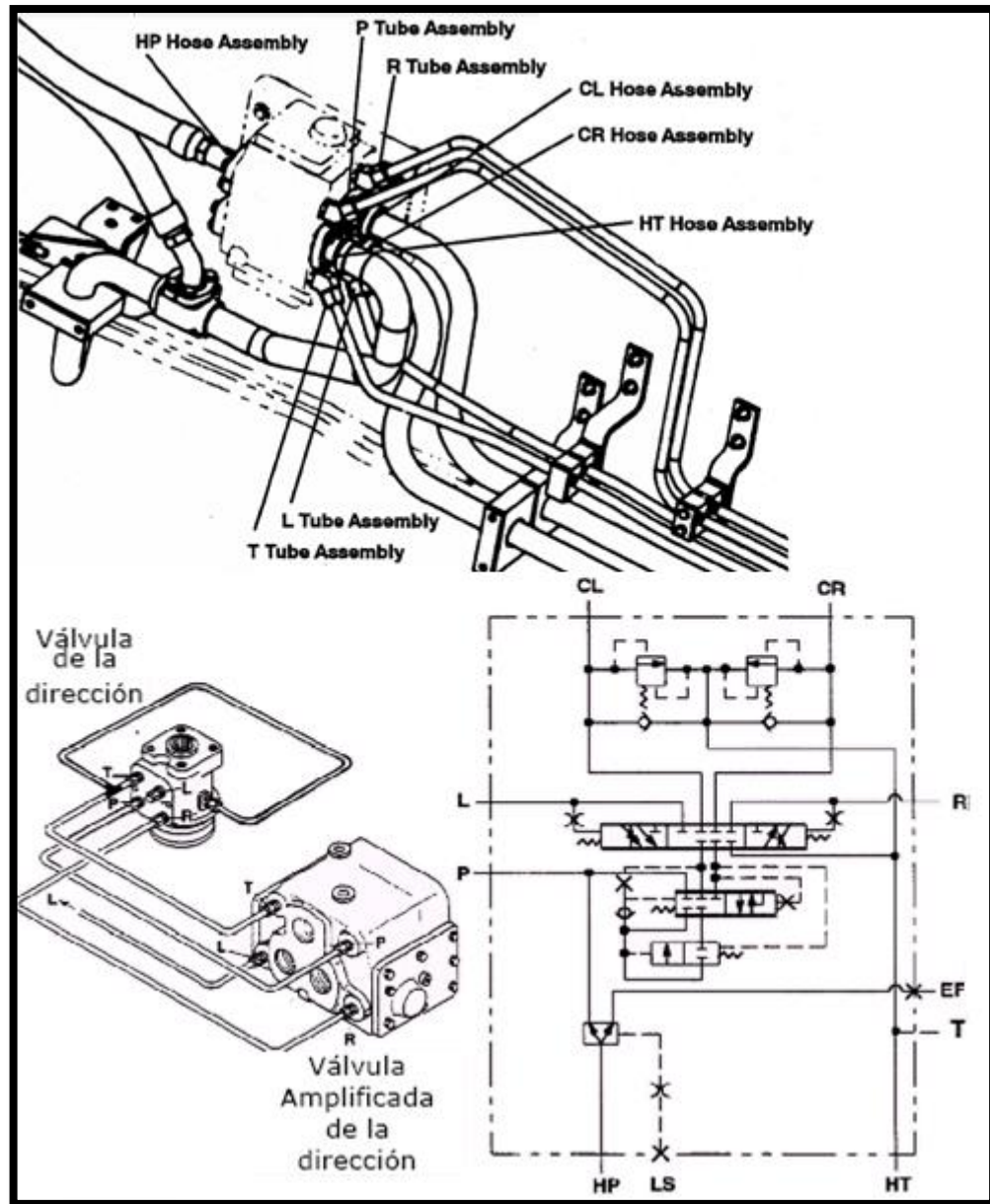
Fuente: HITACHI. Workshop Manual EH5000ACII Rigid Dump Truck. Guelph: Hitachi Truck Manufacturing, 2008.

3.5.1.9 Válvula amplificadora de flujo

La válvula amplificadora de la dirección se encuentra ubicada en el chasis del camión debajo de la válvula RCB.

La válvula amplificadora de flujo es operada por medio del aceite piloto a través de cinco líneas hidráulicas conectadas a la válvula de control de la dirección "orbitrol", que está conectada al volante de dirección. El aceite en las cinco líneas piloto mueven los carretes de la válvula amplificadora de flujo que controlan la cantidad de aceite a presión que se envía a los cilindros de dirección.

Figura 25. Válvula amplificadora de flujo de dirección



Fuente: HITACHI. Workshop Manual EH500ACII Rigid Dump Truck. Guelph: Hitachi Truck Manufacturing, 2008.

3.5.2 Interpretación del plano hidráulico

La siguiente descripción es la interpretación del plano hidráulico que se muestra en la figura 26.

El aceite que está en el tanque hidráulico en la sección de dirección y freno, por gravedad llega hasta la succión de la bomba. De la bomba de dirección, el aceite es enviado a la válvula RCB a través del filtro. De aquí es censado por la válvula de alivio secundario que está ajustada a 3200+/- 25 PSI con un flujo de 40 GPM (151 L/m). Este flujo es enviado a los acumuladores que deben cargar hasta una presión de 3000 PSI.

El aceite de suministro del sistema también se dirige a una línea que va a pilotear la válvula de descarga de la bomba de dirección que está ajustada a un valor máximo de 3000 PSI, y para restablecer la presión del sistema cuando llega a un valor mínimo de 2650 PSI. La válvula de descarga tendrá a la bomba de dirección a máxima entrega de caudal mientras se alcanza la presión de 3000 PSI. Cuando la presión del sistema alcanza los 3000 PSI, la presión piloto del sistema forzará a la válvula de descarga fuera de su asiento, la presión de la bomba retornará a tanque poniendo a la bomba a un caudal mínimo hasta que el operador gire las ruedas de la dirección o la presión del sistema caiga por una fuga interna.

En la posición neutral la válvula de control "Orbitrol" tiene ambos puertos de los cilindros "L" y "R" bloqueados; el aceite en las líneas entre los puertos (L y H) y los cilindros de dirección debe estar estático.

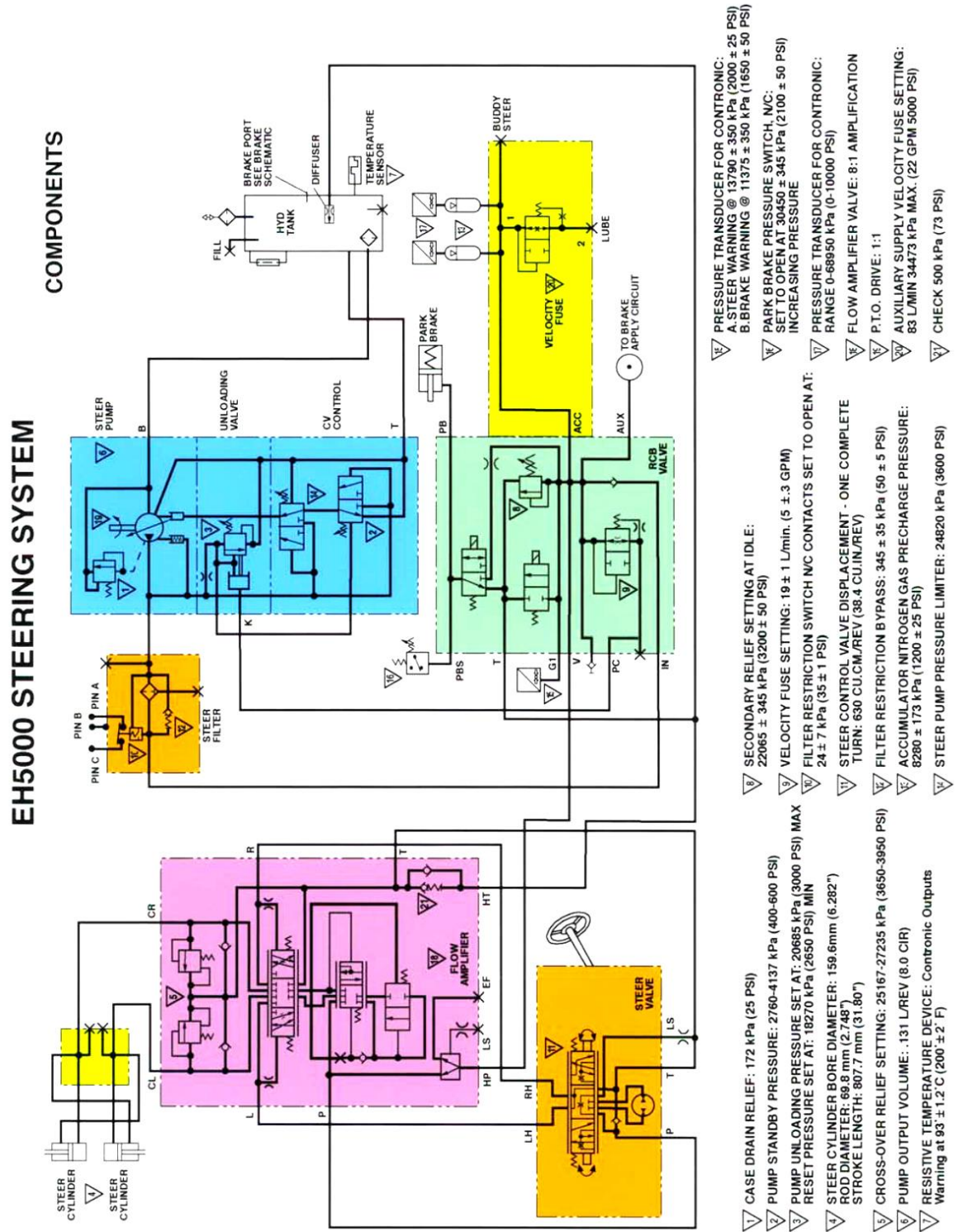
Cuando el switch master está en la posición "ON", las luces de presión de frenos, de dirección y la de advertencia central se iluminan en el panel de control. Una alarma sonora se activara si el motor se prende. El microprocesador en el *Contronic* apagara la alarma de presión de frenos cuando la presión del sistema alcance valores entre 1600 +/- 50 PSI y apagara la luz de advertencia de presión

de dirección cuando la presión del sistema esté entre 1800+/-50 PSI. (Esta presión es medida por el transductor de presión de dirección y freno en la RCB).

Si durante la operación del sistema la temperatura del aceite se incrementa y alcanza un valor de 93 °C (200 F), entonces, la luz de advertencia de alta temperatura de dirección se iluminará (rojo) y un mensaje saldrá en el pantalla del Contronic: *High Steer Temp* (alta temperatura de dirección), la alarma central titilará y la alarma sonora se activará.

Para realizar el giro, el aceite suministrado por el sistema es dirigido de la válvula RCB hacia la válvula amplificadora de flujo y desde ésta hacia la válvula control de la dirección "orbitrol". El volante de la dirección se ha girado en el sentido de las manecillas del reloj, rotando el carrete dentro de una camisa. La rotación alinea los puertos en el carrete y camisa, enviando suministro de aceite (P) al gerotor (motor hidráulico) en la válvula control de la dirección. El aceite dosificado por la gerotor fluye a la parte de atrás en la sección de control de la válvula control de la dirección "Orbitrol" del lado derecho donde es enviado a través de RH al puerto derecho R de la válvula amplificadora de flujo. El cartucho direccional en la válvula amplificadora es cambiado de posición abriendo camino entre el flujo del cartucho y el puerto del cilindro. El cartucho de flujo se cambia permitiendo el flujo del acumulador, a través de la válvula y direccionado a la base del cilindro izquierdo y al extremo del vástago del cilindro derecho. El aceite en los extremos opuestos de los cilindros es forzado a retornar a tanque, primero a través de la válvula de control "orbitrol" (LH). Se utiliza un difusor para dispersar el aceite uniformemente en todo el tanque de dirección.

Figura 26. Plano hidráulico Sistema de Dirección



Fuente: Fuente: HITACHI. Technical Manual EH5000ACII Rigid Dump Truck. Guelph: Hitachi Construction Truck Manufacturing, 2009.

4 LA PROPUESTA

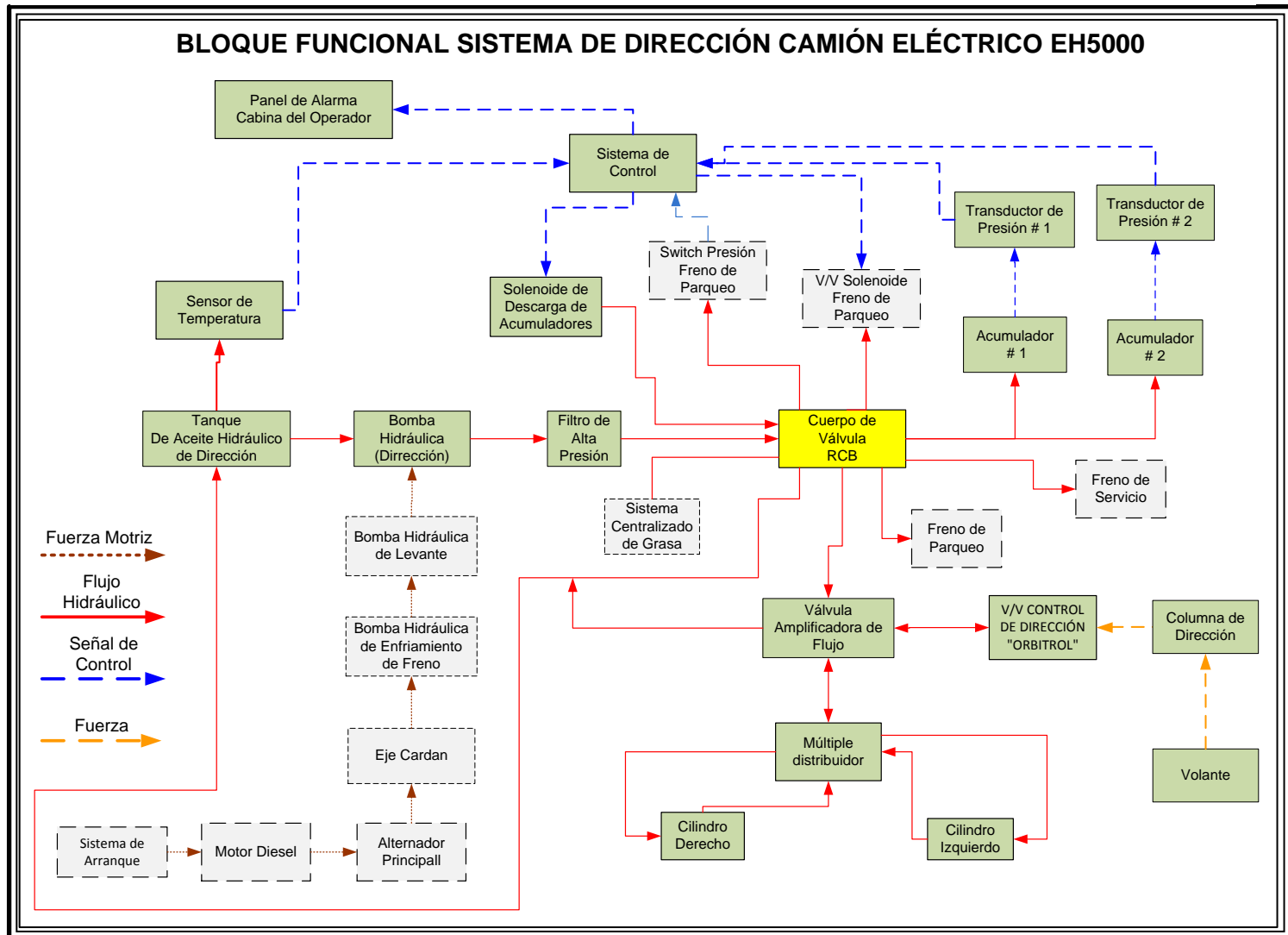
La propuesta es una metodología para implementar una gestión del mantenimiento basada en los modos de falla del sistema y en la confiabilidad de las personas que realizan el mantenimiento del equipo. La metodología consta de seis pasos: primero, Realizar un diagrama funcional del sistema/equipo a analizar, segundo, Determinar variables de criticidad para el sistema, tercero, Realizar desglose Padre-Hijo, cuarto, Realizar un análisis de modos de falla, quinto, Realizar un plan de mantenimiento según el análisis de fallas, y sexto, Aplicar SHERPA (técnica de confiabilidad humana) para el análisis de tareas críticas del plan de mantenimiento; de manera que permita plantear recomendaciones que lleven a reducir los errores humanos en la ejecución del mantenimiento. A continuación se describen los pasos para desarrollar la metodología.

4.1 DIAGRAMA DE BLOQUE FUNCIONAL

El objetivo de hacer un diagrama funcional es para mostrar de manera general la funcionalidad de un sistema. En este caso, se hizo con el fin de identificar los componentes del sistema de dirección, su función dentro de éste y su relación entre sí. Para esto se tomó la ficha técnica del sistema, planos de componentes, planos hidráulicos y de control. Una vez se tuvo esta información se desarrolló el diagrama funcional que muestra el recorrido que hace el aceite durante el ciclo de trabajo del sistema hidráulico de dirección. (Ver figura 27)

Cada cuadro verde representa un componente del sistema, las flechas (según el color) establecen las relaciones mecánicas, eléctricas, de control y de flujo. Los cuadros blancos no hacen parte del sistema pero están relacionados con él.

Figura 27. Bloque Funcional Sistema Dirección EH5000



Fuente: Autores

4.2 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES & CRITICIDAD

La medición de las variables dentro de un sistema/equipo permite conocer el estado del mismo. La clave está en identificar cuáles de ellas son críticas, para controlar su comportamiento y mantener los valores en el estándar bajo el cual el sistema/equipo opera.

En la visita a la empresa, se observó y consultó a técnicos expertos y personal administrativo para determinar las variables críticas del sistema de dirección, así como el comportamiento esperado durante el desarrollo de las actividades diarias de la flota. Las variables que se identificaron fueron: Costos de mantenimiento, Disponibilidad de repuestos, Efectividad del mantenimiento, Tiempo para la reparación, Costo de la pérdida de producción, Seguridad del personal, Afectación otros equipos, Seguridad & Ambiente. A cada una de estas variables se le asignaron criterios bajos, medios y altos, acompañados de una ponderación que determina el grado del impacto de éstas sobre el Mantenimiento, la Operación y la Seguridad & el Ambiente. Además, se establecieron los parámetros para la frecuencia de ocurrencia de las fallas y su ponderación. Ver tablas 5 y 6.

Tabla 5. Frecuencia de ocurrencia de falla

FRECUENCIA DE OCURRENCIA			
NIVEL	DEFINICIÓN	FRECUENCIA (F) & MTBF (HR)	PONDERACIÓN
Muy alta	Ocurre más de quince veces al mes	$F \geq 15$ $MTBF \leq 48$ horas	10
Alta	Ocurre hasta quince veces al mes en La Mina	$7 < F < 15$ $48 \text{ horas} \leq MTBF \leq 120$ horas	7
Medio	Ocurre hasta siete veces al mes en La Mina	$3 < F \leq 7$ $120h \leq MTBF \leq 720$ horas	5
Moderada	Ocurre hasta tres veces al mes en La Mina	$F \leq 3$ $MTBF \geq 720$ horas	3
Baja	Ocurre una vez en el año	$F \leq 0,04$ $MTBF \geq 6,000$ horas	1

Fuente: Autores

Tabla 6. Definición de variables Sistema dirección EH5000

DEFINICIÓN DE VARIABLES					
IMPACTO	FACTOR A EVALUAR	CRITERIOS	PONDERACIÓN	PESO	CONSECUENCIA
IMPACTO EN MANTENIMIENTO	1) Costos de Mantenimiento	Costos de mantenimiento < USD\$500	1	7%	30%
		USD\$500 < Costos de mantenimiento < USD\$1500	3		
		Costos de mantenimiento > USD\$1500	5		
	2) Disponibilidad de Repuestos	tiempo consecución = 35 minutos	1	6%	
		2hr<tiempo consecución <4hr	3		
		tiempo consecución > 24 hr	5		
	3) Efectividad de mantenimiento	Después de una intervención de mantenimiento no devuleven el equipo en el mes por el componente/sistema intervenido	1	9%	
		Después de una intervención de mantenimiento lo devuleven entre 1 y 2 veces en el mes por el componente/sistema intervenido	3		
		Después de una intervención de mantenimiento lo devuleven 3 veces en el mes por el componente/sistema intervenido	5		
	4) Tiempo para la reparación MTTR	MTTR< 4hr	1	8%	
		4hr ≤ MTTR < 6hr	3		
		MTTR ≥ 6hr	5		
IMPACTO OPERACIONAL Pérdida de producción = (Tiempo no operación x costo/hora)	5) Costo de la pérdida de Producción (CPP)	Menor a la Meta (No genera ningún efecto significativo sobre operaciones y producción) 0<CPP<USD\$1839,36 (Hasta 3hr equipo down)	1	40%	40%
		Igual a la Meta (Impacta en niveles de producción o calidad). Ingresos no recibidos igual a CPP=USD\$2452,48 (Tiempo down del equipo = 4hr)	3		
		Mayor a la Meta (Pérdida de la capacidad de acarreo). Ingresos no recibidos mayores a CPP= USD\$2452,48 (Tiemp down del equipo mayor a 4 hr)	5		
IMPACTO EN SEGURIDAD - AMBIENTE	6) Seguridad del Personal	No provoca ningún tipo de daños o lesiones a las personas	1	12%	30%
		Afecta al menos una persona, generando lesiones sin o con incapacidad temporal	3		
		Afecta a más de una persona, generando incapacidad total permanente o la muerte	5		
	7) Afectación otros equipos	No existe riesgo de afectar equipos cercanos	1	9%	
		Costos medio de la afectación (pérdida parcial de otros equipos)	3		
		Costos de la afectación alto (pérdida total de otros equipos)	5		
	8) Seguridad Ambiente	No hay afectación del medio ambiente	1	9%	
		Afectación parcial. Repercutiendo en la fauna, la flora, y cultivos. La situación se controla con las personas que intervienen directamente en el proceso.	3		
		Indisponibilidad total de recursos naturales de la comunidad, se requiere intervención de los organismos gubernamentales, hasta normalizar el área afectada.	5		

Fuente: Autores

Una vez determinados los impactos, los factores a evaluar, sus criterios y frecuencias de falla, se estableció la fórmula para determinar la criticidad.

$$CRITICIDAD = Frecuencia \times Consecuencia$$

Consecuencia

= IMPACTO MANTENIMIENTO (IM)

+ IMPACTO OPERACIONAL (IO)

+ IMPACTO EN SEGURIDAD & AMBIENTE (ISA)

$$Frecuencia = FRECUENCIA DE OCURRENCIA (FO)$$

4.2.1 Matriz de Criticidad

Una matriz de criticidad es una herramienta que permite identificar a través de ponderaciones, el grado de incidencia de las variables en los sistemas/equipos.

Para determinar los posibles valores que arrojaría la evaluación de la criticidad de componentes, se hizo una combinación estadística de las probabilidades de ocurrencia para determinar los valores mínimos y máximos con los cuales se definen cuándo un componente es crítico, semi crítico o normal. De lo anterior se tiene la matriz de la tabla 7. En las figuras 28 y 29 se muestra ampliado las dos secciones de la matriz para mejor visualización.

En la figura 28 se muestran las fórmulas con las que se calculan los impactos que produce cada factor evaluado con base en la ponderación que se asignó en la tabla 6. La suma de los impactos se denomina *Consecuencia*. En la figura 29 se detalla el rango de la *Frecuencia de Ocurrencia* de las fallas y se nota la fórmula de *Criticidad* para clasificar los componentes según los valores resultantes de la evaluación.

Tabla 7. Matriz de Criticidad

MATRIZ DE CRITICIDAD														
IMPACTO / FACTOR A EVALUAR								FRECUENCIA DE OCURRENCIA (FO)					EFECTO / CONSECUENCIA (IM + IO + ISA)	
MANTENIMIENTO (IM) IM= [(CM*0,07)+(DR*0,06)+(EM*0,09)+(MTTR*0,08)]				OPERACIÓN (IO) IO = CPP*0,4	SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE (ISA) ISA =[(SP*0,12)+ (AE*0,09)+(SA*0,09)]									
Costo de Mantenimiento (CM)	Disponibilidad de Repuestos (DR)	Efectividad de Mantenimiento (EM)	Tiempo para la Reparación (MTTR)	Costo de la pérdida de Producción (CPP)	Seguridad del Personal (SP)	Afectación otros equipos (AE)	Seguridad Ambiente (SA)	No ha ocurrido nunca en la mina, pero es probable que ocurra según la experiencia en el sector minero	Ocurre hasta tres veces al mes en La Mina	Ocurre hasta siete veces al mes en La Mina	Ocurre hasta quince veces al mes en La Mina	Ocurre más de quince veces al mes	CRITICIDAD (IM+IO+ISA) * FO	
7%	6%	9%	8%	40%	12%	9%	9%	Baja	Moderada	Medio	Alta	Muy Alta		
								1	3	5	7	10		
Costos de mantenimiento < USD\$500	tiempo consecución = 35 minutos	No devuelven el equipo por la misma falla en el mes	MTTR: 4hr	Menor a la Meta (No genera ningún efecto significativo sobre operaciones y producción) 0<CPP<USD\$1838,36 (Hasta 3hr equipo down)	No provoca ningún tipo de daños o lesiones a las personas	No existe riesgo de afectar equipos cercanos	No hay afectación del medio ambiente	1	16			24,9	(1 < X < 16,10)	Normal
USD\$500 < Costos de mantenimiento < USD\$1500	2hr<tiempo consecución <4hr	Devuelven el equipo por la misma falla hasta 2 veces al mes	4hr ≤ MTTR < 6hr	Igual a la Meta (Impacta en niveles de producción o calidad). Ingresos no recibidos igual a CPP=USD\$2452,48 (Tiempo down del equipo = 4hr)	Afecta al menos una persona, generando lesiones sin o con incapacidad temporal	Costos medio de la afectación (pérdida parcial de otros equipos)	Afectación parcial. Repercutiendo en la fauna, la flora, y cultivos. La situación se controla con las personas que intervienen directamente en el proceso.	16		20		25	(16,10 ≤ X < 25)	Semi Critico
Costos de mantenimiento > USD\$1500	tiempo consecución > 24 hr	Devuelven el equipo por la misma falla mas de 3 veces al mes	MTTR ≥ 6hr	Mayor a la Meta (Pérdida de la capacidad de acarreo). Ingresos no recibidos mayores a CPP= USD\$2452,48 (Tiempo down del equipo mayor a 4 hr)	Afecta a más de una persona, generando incapacidad total permanente o la muerte	Costos de la afectación alto (pérdida total de otros equipos)	Indisponibilidad total de recursos naturales de la comunidad, se requiere intervención de los organismos gubernamentales, hasta normalizar el área afectada.	16,1			25	50	(25 ≤ X ≤ 50)	Critico

Fuente: Autores

Figura 28. Ampliación Impacto/Factor a Evaluar – Matriz de Criticidad

IMPACTO / FACTOR A EVALUAR							
MANTENIMIENTO (IM) [[CM*0,07)+(DR*0,06)+(EM*0,09)+(MTTR*0,08]]				IM=	OPERACIÓN (IO) IO = CPP*0,4	SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE (ISA) ISA =[(SP*0,12)+ (AE*0,09)+(SA *0,09)]	
Costo de Mantenimiento (CM)	Disponibilidad de Repuestos (DR)	Efectividad de Mantenimiento (EM)	Tiempo para la Reparación (MTTR)	Costo de la perdida de Producción (CPP)	Seguridad del Personal (SP)	Afectación otros equipos (AE)	Seguridad Ambiente (SA)
7%	6%	9%	8%	40%	12%	9%	9%
Costos de mantenimiento < USD\$500	tiempo consecución = 35 minutos	No devuelven el equipo por la misma falla en el mes	MTTR < 4hr	Menor a la Meta (No genera ningún efecto significativo sobre operaciones y producción) 0 < CPP < USD\$1839,36 (Hasta 3hr equipo down)	No provoca ningún tipo de daños o lesiones a las persona	No existe riesgo de afectar equipos cercanos	No hay afectación del medio ambiente
USD\$500 < Costos de mantenimiento < USD\$1500	2hr < tiempo consecución < 4hr	Devuelven el equipo por la misma falla hasta 2 veces al mes	4hr ≤ MTTR < 6hr	Igual a la Meta (Impacta en niveles de producción o calidad). Ingresos no recibidos igual a CPP=USD\$2452,48 (Tiempo down del equipo = 4hr)	Afecta al menos una persona, generando lesiones sin o con incapacidad temporal	Costos medio de la afectación (pérdida parcial de otros equipos)	Afectación parcial. Repercutiendo en la fauna, la flora, y cultivos. La situación se controla con las personas que intervienen directamente en el proceso.
Costos de mantenimiento > USD\$1500	tiempo consecución > 24 hr	Devuelven el equipo por la misma falla mas de 3 veces al mes	MTTR ≥ 6hr	Mayor a la Meta (Pérdida de la capacidad de acarreo). Ingresos no recibidos mayores a CPP= USD\$2452,48 (Tiemp down del equipo mayor a 4 hr)	Afecta a más de una persona, generando incapacidad total permanente o la muerte	Costos de la afectación alto (pérdida total de otros equipos)	Indisponibilidad total de recursos naturales de la comunidad, se requiere intervención de los organismos gubernamentales, hasta normalizar el área afectada.

Fuente: Autores

Figura 29. Ampliación Frecuencia de Ocurrencia –Matriz de Criticidad

FRECUENCIA DE OCURRENCIA (FO)					EFECTO / CONSECUENCIA (IM + IO + ISA)	
No ha ocurrido nunca en la mina, pero es probable que ocurra según la experiencia en el sector minero	Ocurre hasta tres veces al mes en La Mina	Ocurre hasta siete veces al mes en La Mina	Ocurre hasta quince veces al mes en La Mina	Ocurre más de quince veces al mes	CRITICIDAD (IM+IO+ISA) * FO	
Baja	Moderada	Medio	Alta	Muy Alta		
1	3	5	7	10		
1	16			24,9	(1 < X < 16,10)	Normal
16		20		25	(16,10 ≤ X < 25)	Semi Critico
16,1			25	50	(25 ≤ X ≤ 50)	Critico

Fuente: Autores

4.3 DESGLOSE PADRE – HIJO

En este punto se hace una relación de jerarquía del equipo y sus componentes para identificar el grado de dependencia entre ellos.

A partir del bloque funcional desarrollado en el numeral 4.1, se detallan los componentes de cada equipo del sistema de dirección. El resultado de este detalle es una tabla donde se muestra la relación Padre-Hijo, es decir, los equipos y sus componentes asociados. Establecida esta relación, se procedió a evaluar los componentes para determinar su criticidad en el sistema (Ver tabla 8), teniendo en cuenta los factores y variables definidas en el numeral 4.2 y la tasa de fallas de componentes descritas en la tabla 4.

Tabla 8. Desglose Padre-Hijo y criticidad de componentes

UBICACIÓN	SISTEMA	EQUIPO	COMPONENTE	IMPACTO										TOTAL IMPACTO Subtotal (IM+IO+ISA)	FRECUENCIA	CRITICIDAD = TOTAL IMPACTO * FRECUENCIA	
				Impacto Mantenimiento				Impacto Operación		Seguridad - Ambiente							
				Costo Mantenimiento	Disponibilidad Repuestos	Efectividad	Tiempo para reparar MTTR	Subtotal IM	Costo de la pérdida de producción	Subtotal IO	Seguridad del Personal	Afectación otros equipos	Seguridad Ambiente				Subtotal ISA
7%	6%	9%	8%	40%	12%	9%	9%										
CAMION ELÉCTRICO EH5000	SISTEMA DE DIRECCIÓN			5	3	5	3	1,22	5	2	3	5	3	1,08	4,3	10	43
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN		5	3	1	3	0,86	5	2	3	3	3	0,9	3,76	7	26,32
		FILTRO RESPIRADERO		1	1	1	1	0,3	1	0,4	3	1	1	0,54	1,24	1	1,24
		MALLAS		1	1	1	5	0,62	5	2	3	3	3	0,9	3,52	1	3,52
		LLAVES DE PASO		1	1	1	5	0,62	5	2	3	3	3	0,9	3,52	1	3,52
		MANGUERAS DE SUCCIÓN		1	3	1	3	0,58	3	1,2	3	3	3	0,9	2,68	3	8,04
		MANGUERAS DE RETORNO		1	3	1	3	0,58	3	1,2	3	3	3	0,9	2,68	3	8,04
		SENSOR TEMPERATURA ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN		1	1	3	1	0,48	1	0,4	1	1	1	0,3	1,18	7	8,26
		ACEITE HIDRÁULICO		5	3	5	1	1,06	1	0,4	3	1	3	0,72	2,18	10	21,8
		BOMBA DE DIRECCIÓN		5	3	1	5	1,02	5	2	3	3	3	0,9	3,92	7	27,44
		VALVULA COMPENSADORA		3	3	5	1	0,92	1	0,4	3	3	3	0,9	2,22	10	22,2
		MANGUERA		1	3	1	1	0,42	1	0,4	3	1	3	0,72	1,54	7	10,78
		FILTRO HIDRÁULICO DE ALTA PRESIÓN		1	1	1	1	0,3	1	0,4	3	3	3	0,9	1,6	8	8
		TUBO		1	3	1	1	0,42	1	0,4	3	3	3	0,9	1,72	5	8,6
		VALVULA R.C.B		3	3	1	3	0,72	3	1,2	3	3	1	0,72	2,64	5	13,2
		TRANSDUCTOR DE PRESIÓN DE DIRECCIÓN/FRENO		1	1	1	1	0,3	1	0,4	1	1	1	0,3	1	10	10
		VALVULA CHECK		1	1	1	3	0,46	1	0,4	3	3	3	0,9	1,76	3	5,28
		VALVULA DE ALIVIO SECUNDARIO		1	1	1	1	0,3	1	0,4	1	1	1	0,3	1	1	1
		SOLENOIDE DE DESCARGA ACUMULADORES DE DIRECCIÓN		1	1	1	1	0,3	1	0,4	1	3	3	0,66	1,36	1	1,36
		MANGUERA		1	3	1	3	0,58	3	1,2	3	3	3	0,9	2,68	7	18,76
		ACUMULADORES DE DIRECCION		1	3	3	3	0,76	3	1,2	3	3	3	0,9	2,86	10	28,6
		TRANSDUCTOR DE PRESIÓN DEL ACUMULADOR		1	1	1	1	0,3	1	0,4	3	3	1	0,72	1,42	1	1,42
		VALVULA AMPLIFICADORA DE FLUJO		5	3	1	3	0,86	3	1,2	3	3	3	0,9	2,96	5	14,8
		MANGUERA		1	3	1	3	0,58	3	1,2	3	1	3	0,72	2,5	5	12,5
		COLUMNA DE DIRECCION		1	3	1	1	0,42	1	0,4	1	3	1	0,48	1,3	5	6,5
		VOLANTE															N/A
		VALVULA CONTROL DE LA DIRECCION "ORBITROL"		5	3	3	3	1,04	3	1,2	3	1	3	0,72	2,96	10	29,6
		MANGUERA		1	3	1	3	0,58	3	1,2	3	3	3	0,9	2,68	5	13,4
		MULTIPLE DISTRIBUIDOR															N/A
		CILINDROS		1	3	1	3	0,58	3	1,2	3	1	3	0,72	2,5	7	17,5
		MANGUERA		1	3	1	1	0,42	1	0,4	3	1	3	0,72	1,54	10	15,4
		MANGUERAS EN GENERAL		1	3	3	1	0,6	1	0,4	3	1	3	0,72	1,72	10	17,2

Fuente: Autores

Según los resultados de la tabla 8, el sistema de dirección está compuesto por once equipos, de los cuales según la evaluación realizada, arroja que son críticos (Rojo) cuatro de ellos, entre los cuales están: el taque hidráulico con 26,32 puntos (Figura 30), la bomba de dirección con 27,44 puntos (Figura 31), los acumuladores con 28,6 puntos (Figura 32), la válvula control de la dirección “orbitrol” con 29,6 puntos (Figura 33). El sistema de distribución del flujo que son las mangueras se tomó como crítico para más adelante evaluar la criticidad de sus modos de falla.

Figura 30. Evaluación de criticidad del Tanque hidráulico

UBICACIÓN	SISTEMA	EQUIPO	COMPONENTE	IMPACTO										TOTAL IMPACTO Subtotal (IM+IO+ISA)	FRECUENCIA	CRITICIDAD = TOTAL IMPACTO * FRECUENCIA	
				Impacto Mantenimiento					Impacto Operación		Seguridad - Ambiente						
				Costo Mantenimiento	Disponibilidad Repuestos	Efectividad	Tiempo para reparar MTTR	Subtotal IM	Costo de la pérdida de producción	Subtotal IO	Seguridad del Personal	Afectación otros equipos	Seguridad Ambiente				Subtotal ISA
				7%	6%	9%	8%		40%		12%	9%	9%				
CAMIÓN ELÉCTRICO EH5000	SISTEMA DE DIRECCIÓN			5	3	5	3	1,22	5	2	3	5	3	1,08	4,3	10	43
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN		5	3	1	3	0,86	5	2	3	3	3	0,9	3,76	7	26,32

Fuente: Autores

Figura 31. Evaluación de criticidad de la Bomba de dirección

UBICACIÓN	SISTEMA	EQUIPO	COMPONENTE	IMPACTO										TOTAL IMPACTO Subtotal (IM+IO+ISA)	FRECUENCIA	CRITICIDAD = TOTAL IMPACTO * FRECUENCIA	
				Impacto Mantenimiento					Impacto Operación		Seguridad - Ambiente						
				Costo Mantenimiento	Disponibilidad Repuestos	Efectividad	Tiempo para reparar MTTR	Subtotal IM	Costo de la pérdida de producción	Subtotal IO	Seguridad del Personal	Afectación otros equipos	Seguridad Ambiente				Subtotal ISA
				7%	6%	9%	8%		40%		12%	9%	9%				
CAMIÓN ELÉCTRICO EH5000	SISTEMA DE DIRECCIÓN			5	3	5	3	1,22	5	2	3	5	3	1,08	4,3	10	43
		BOMBA DE DIRECCIÓN		5	3	1	5	1,02	5	2	3	3	3	0,9	3,92	7	27,44

Fuente: Autores

Figura 32. Evaluación de criticidad Acumuladores de dirección

UBICACIÓN	SISTEMA	EQUIPO	COMPONENTE	IMPACTO											TOTAL IMPACTO Subtotal (IM+IO+ISA)	FRECUENCIA	CRITICIDAD = TOTAL IMPACTO * FRECUENCIA
				Impacto Mantenimiento					Impacto Operación		Seguridad - Ambiente						
				Costo Mantenimiento	Disponibilidad Repuestos	Efectividad	Tiempo para reparar MTTR	Subtotal IM	Costo de la pérdida de producción	Subtotal IO	Seguridad del Personal	Afectación otros equipos	Seguridad Ambiente	Subtotal ISA			
7%	6%	9%	8%		40%		12%	9%	9%								
CAMION ELÉCTRICO EH5000	SISTEMA DE DIRECCIÓN			5	3	5	3	1,22	5	2	3	5	3	1,08	4,3	10	43
		ACUMULADORES DE DIRECCIÓN		1	3	3	3	0,76	3	1,2	3	3	3	0,9	2,86	10	28,6

Fuente: Autores

Figura 33. Evaluación de criticidad Válvula Orbitrol

UBICACIÓN	SISTEMA	EQUIPO	COMPONENTE	IMPACTO											TOTAL IMPACTO Subtotal (IM+IO+ISA)	FRECUENCIA	CRITICIDAD = TOTAL IMPACTO * FRECUENCIA
				Impacto Mantenimiento					Impacto Operación		Seguridad - Ambiente						
				Costo Mantenimiento	Disponibilidad Repuestos	Efectividad	Tiempo para reparar MTTR	Subtotal IM	Costo de la pérdida de producción	Subtotal IO	Seguridad del Personal	Afectación otros equipos	Seguridad Ambiente	Subtotal ISA			
7%	6%	9%	8%		40%		12%	9%	9%								
CAMION ELÉCTRICO EH5000	SISTEMA DE DIRECCIÓN			5	3	5	3	1,22	5	2	3	5	3	1,08	4,3	10	43
		VALVULA CONTROL DE LA DIRECCIÓN "ORBITROL"		5	3	3	3	1,04	3	1,2	3	1	3	0,72	2,96	10	29,6

Fuente: Autores

4.4 MODOS DE FALLA

Los modos de falla son la forma en que un sistema/equipo falla. Éstos se estandarizaron con base en la norma ISO14224, que permite, que a partir de un código se relacione un modo de falla con una posible causa. En las tablas 9, 10,11, 12, 13 y 14 se muestra el resumen. Estas tablas son la base para el Análisis de modos de falla del sistema de dirección que se desarrolla en la sección 4.4.1.

Tabla 9. Estándar Modos de falla (1)

ESTANDAR MODOS DE FALLA			
Código	Modo de Falla	Norma/Área	Descripción
M1	PERDIDA DE PRESION EN EL SISTEMA	MECÁNICAS	DISMINUCIÓN DE LA PRESIÓN EN LOS CONDUCTOS, TUBERIA PERFORADA FUNCIONAMIENTO ANORMAL DEL SISTEMA
M2	PRESIÓN SUMINISTRO DE ACEITE ALTA	MECÁNICAS	PRESIÓN DE SUMINISTRO DE ACEITE ALTA
M3	FALLA LUBRICACION	MECÁNICAS	
M4	BAJO NIVEL DE ACEITE	MECÁNICAS	
M5	ALTO NIVEL DE ACEITE	MECÁNICAS	
M6	FUGA EXTERNA	MECÁNICAS	
INL	FUGA INTERNA	MECANICA / NORMA ISO 14224	FUGA INTERNA DE FLUIDOS DEL SERVICIO O PROCESO
LCP	FUGA EN POSICIÓN CERRADA.	MECANICA / NORMA ISO 14224	PASE EN POSICIÓN DE CERRADO (VÁLVULAS)
ELF	FUGA DE COMBUSTIBLE	MECANICA / NORMA ISO 14224	FUGA EXTERNA DEL ABASTECIMIENTO PRINCIPAL (GASOLINA - GAS-ACPM Y OTROS)
ELP	FUGA FLUIDO DE PROCESO	MECANICA / NORMA ISO 14224	FUGA EXTERNA DEL MEDIO EMPLEADO PARA UN PROCESO
ELU	FUGA FLUIDO SERV AUX	MECANICA / NORMA ISO 14224	FUGA EXTERNA DE UN MEDIO PARA UN SERVICIO (LUBRICANTE - AGUA DE ENFRIAMIENTO)
BRD	PARADA POR ROTURA	MECANICA / NORMA ISO 14224	DAÑO GRAVE (ROTURA, EXPLOSION, OCURRENCIA DE ALGO ANORMAL)
LBP	PRESIÓN SUMINISTRO DE ACEITE BAJA.	MECANICA / NORMA ISO 14224	PRESIÓN DE SUMINISTRO DE ACEITE BAJA
PLU	TAPONADO / OBSTRUIDO / ATASCADO / AHOGADO	MECANICA / NORMA ISO 14224	RESTRICCIONES DE FLUJO (OBSTRUIDO,TAPONADO)
IHT	INSUFICIENTE TRANSF. DE CALOR	MECANICA / NORMA ISO 14224	INSUFICIENCIA EN TRANSFERENCIA DE CALOR (CALENTAMIENTO O ENFRIAMIENTO DEBAJO DE APROBACIÓN)

Fuente: Autores

Tabla 10. Estándar Modos de falla (2)

ESTANDAR MODOS DE FALLA			
Código	Modo de Falla	Norma/Área	Descripción
LOA	CAÍDA DE CARGA QUE SE MUEVE	MECANICA / NORMA ISO 14224	CAIDA DE CARGA MECANICA (MASA)
MOF	FALLA AL DESTEMPLARSE	MECANICA / NORMA ISO 14224	FALLA AL DESTEMPLARSE. EJEMPLO: DESTEMPLE DE VIENTOS EN DISTRIBUCIÓN ENERGÍA. CABLES, LAZOS, ESTROBOS, TENSORES. GRILLETES CADENAS ETC. QUE TIENEN LA FUNCIÓN DE SOSTENER ALGO Y DEJAN DE HACERLO AL PERDER TENSIÓN
NOI	RUIDO	MECANICA / NORMA ISO 14224	RUIDO ANORMAL
STD	DEFICIENCIA ESTRUCTURAL	MECANICA / NORMA ISO 14224	DEFICIENCIA ESTRUCTURAL, DAÑO EN MATERIAL (ROTO, RAJADO, FISURA, DESGASTE, CORROSIÓN, FRACTURA)
OHE	SOBRECALENTAMIENTO	MATERIAL/NORMA ISO 14224	SOBRECALENTAMIENTO DE PARTES DE MÁQUINAS, REFRIGERANTES, ELEMENTOS DE DESECHO (COMBUSTIÓN). EN DISTRIBUCIÓN ENERGÍA MALAS CONEXIONES ELÉCTRICAS
AIR	LECTURA ANORMAL DE INSTRUMENTO.	INSTRUMENTOS / NORMA ISO 14224	INSTRUMENTO CON INDICACIÓN DEFECTUOSA, FALSA ALARMA
IEXT1	CONTAMINACIÓN	INFLUENCIA EXTERNA	FALLA POR CONTAMINACIÓN EN LA SUPERFICIE, EN EL FLUIDO, GAS, PARTES, ELEMENTOS, ETC.
C1	FALLA EN CONTROL	CONTROL	FALLA EN SU FUNCIÓN. REGULACIÓN
C2	FALLA DE SOFTWARE	CONTROL	NO MONITOREO, CONTROL, OPERACIÓN DEBIDO A FALLAS EN EL SOFTWARE
C3	FALLA PROTECCIÓN DEL EQUIPO	CONTROL	LA PROTECCIÓN NO ACTUÓ DENTRO DE LOS PARÁMETROS ESTABLECIDOS
POW	POTENCIA INSUFICIENTE	CONTROL / NORMA ISO 14224	POTENCIA INSUFICIENTE (FALTA DE POTENCIA O MUY POCAS POTENCIA DE SUMINISTRO)
PTF	FALLA TRANSMISION SEÑAL/POTENC	CONTROL / NORMA ISO 14224	FALLA EN LA TRANSMISION DE SEÑAL O POTENCIA
DOP	OPERACION RETARDADA	CONTROL / NORMA ISO 14224	OPERACIÓN RETARDADA (TIEMPO DE APERTURA O CIERRE)
FTF	FALLA AL ACTIVAR	CONTROL / NORMA ISO 14224	FALLA PARA HACER UNA FUNCIÓN DEMANDADA (NO RESPONDE A UNA SEÑAL O UNA ACTIVACIÓN MANUAL O AUTOMÁTICA) EJEMPLO: ALARMAS, SENSORES
OWD	CIERRE O APERTURA NO DESEADA	CONTROL / NORMA ISO 14224	CIERRE O APERTURA NO DESEADA (OPERA SIN SOLICITUD EXPLÍCITA. SIN ORDEN O COMANDO)
LOR	UNIDADES REDUNDANTES NO FUNCIONA	CONTROL / NORMA ISO 14224	UNIDADES REDUNDANTES NO FUNCIONAN PERDIDA DE RESPALDO Y/O REDUNDANCIA
SHH	SALIDA POR SEÑAL DE ALTO	CONTROL / NORMA ISO 14224	SALIDA POR SEÑAL DE ALTO
SLL	SALIDA POR SEÑAL DE BAJO	CONTROL / NORMA ISO 14224	SALIDA POR SEÑAL DE BAJO
STP	NO PARA	CONTROL / NORMA ISO 14224	FALLA EN SOLICITUD DE PARAR
UST	PARO INESPERADO	CONTROL / NORMA ISO 14224	PARO INESPERADO

Fuente: Autores

Tabla 11. Estándar Modos de falla (3)

ESTANDAR MODOS DE FALLA			
Código	Modo de Falla	Norma/Área	Descripción
E1	CORTO CIRCUITO	ELECTRICAS	CORTO CIRCUITO
E2	CIRCUITO ABIERTO	ELECTRICAS	DESCONEXIÓN, INTERRUPCIÓN, APERTURA DE CABLES O ALAMBRES
E3	FALLA TIERRA / AISLAMIENTO	ELECTRICAS	FALLA A TIERRA, AISLAMIENTOS INSUFICIENTES
E4	FALLA SUMINISTRO DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA	ELECTRICAS	FALLA RELACIONADA CON EL SUMINISTRO Y TRANSMISIÓN DE ELECTRICIDAD, NO SE CONOCEN MÁS DETALLES
ERO	SALIDA ERRADA	ELECTRICAS/ NORMA ISO 14224	SALIDA DE VARIABLE O PRODUCTO CON OSCILACIÓN, INESTABLE
FCO	FALLA AL CONECTAR	ELECTRICAS/ NORMA ISO 14224	FALLA AL CONECTAR O ACOPLAR DOS O MAS ELEMENTOS
FDC	FALLA AL DESCONECTAR	ELECTRICAS/ NORMA ISO 14224	
FOF	FRECUENCIA DE SALIDA ALTA/BAJA	ELECTRICAS/ NORMA ISO 14224	FALLA EN LA FRECUENCIA DE SALIDA O ENTREGA (EQUIVOCADA, OSCILANDO, POR FUERA DEL RANGO). EJEMPLO: ES APLICADO EN GENERADORES DE ENERGIA Y VARIADORES DE VELOCIDAD.
SYN	FALLA AL SINCRONIZAR	ELECTRICAS/ NORMA ISO 14224	FALLA AL SINCRONIZAR
FOV	VOLTAJE DE SALIDA / ENTREGA - ALTO/BAJO	ELECTRICAS/ NORMA ISO 14224	SALIDA O ENTREGA DE VOLTAJE FUERA DE RANGO, ERRADO, EQUIVOCADO, INESTABLE.
FRO	FALLA ANTE LA SOLICITUD DE GIRAR	MECÁNICA / CONTROL / NORMA ISO 14224	
FTC	FALLA PARA CERRAR	MECANICA / CONTROL NORMA ISO 14224	FALLA PARA HACER UN CIERRE DEMANDADO, SE ATASCA O NO CIERRA
HIO	ALTA SALIDA	MECANICA / CONTROL NORMA ISO 14224	SALIDA DE VARIABLE O PRODUCTO POR ENCIMA DE LO ACEPTABLE. EJEMPLO, ALTA PRESION, ALTA VELOCIDAD,
LOO	BAJA SALIDA	MECANICA / CONTROL NORMA ISO 14224	SALIDA DE VARIABLE O PRODUCTO POR DEBAJO DE LO ACEPTABLE EJECUTORIA POR DEBAJO DE LO ESPECIFICADO REGULACION DEFECTUOSA
FTI	FALLA GENERAL DE OPERACIÓN	ELECTRICA / MECANICA / CONTROL NORMA ISO 14224	FALLA GENERAL DE OPERACIÓN (FALLA PARA HACER SU FUNCIÓN) VARIOS SINTOMAS NO DETERMINADOS.
PDE	DESVIACION PARAMETRO	ELECTRICA / MECANICA / CONTROL NORMA ISO 14224	DESVIACION PARAMETRO MONITOREADO. PARÁMETROS BAJO CONTROL QUE EXCEDEN LÍMITES. (NIVELES, TEMPERATURAS, PRESIÓN, ETC)
FTP	FALLA EN FUNCIONAMIENTO CUANDO ES REQUERIDO	ELECTRICA / MECANICA / CONTROL NORMA ISO 14224	
FTO	FALLA PARA ABRIR	ELECTRICA / MECANICA / CONTROL NORMA ISO 14224	NO ABRE CUANDO SE LE DA LA ORDEN, SE ATASCA CERRADA O NO ABRE COMPLETAMENTE. EJEMPLO: VALVULAS, COMPUERTA, INTERRUPUTOR, CAJA PRIMARIA
FTR	NO REGULA	ELECTRICA / MECANICA / CONTROL NORMA ISO 14224	SOLO PARA ELEMNTOS QUE CUMPLAN ESTA FUNCION. NO REGULA O CONTROLA EL FLUJO DEL SERVICIO (ENERGIA, GAS, COMBUSTIBLE, AGUA ECT).

Fuente: Autores

Tabla 12. Estándar Modos de falla (4)

ESTANDAR MODOS DE FALLA			
Código	Modo de Falla	Norma/Área	Descripción
E-CONT1	TERMINALES FLOJOS /CORROIDOS /EN MAL ESTADO	ELECTRICA / CONTROL NORMA ISO 14224	TERMINALES SOPORTES DE CABLE DETERIORADO, SUELTO, BORNERA FOJAS
E-CONT2	FALLA CABLEADO - CONEXIONADO	ELECTRICA / CONTROL NORMA ISO 14224	CABLES SULFATADOS PARTIDO, ENTORCHADO Y SIN CONTINUIDAD
FTS	NO ARRANCA	ELECTRICA / CONTROL NORMA ISO 14224	FALLA EN SOLICITUD DE ARRANQUE
HIU	SALIDA ALTA, LECTURA DESCONOCIDA	ELECTRICA / CONTROL NORMA ISO 14224	SALIDA ALTA, LECTURA DESCONOCIDA ENTREGA UN VALOR POR ENCIMA DEL PARAMETRO DE REFERENCIA, Y LA DIFERENCIA NO SE PUEDE CUANTIFICAR.
LOU	SALIDA BAJA, LECTURA DESCONOCIDA	ELECTRICA / CONTROL NORMA ISO 14224	SALIDA BAJA, LECTURA DESCONOCIDA

Fuente: Autores

Tabla 13. Estándar Causa de falla (1)

CAUSA DE FALLAS			
Código	Modo de Falla	Norma/Área	Descripción
C-M1	FUGA	MECÁNICAS	FUGA INTERNA O EXTERNA, TANTO DE LÍQUIDOS, GASES, ETC. SI EL MODO DE FALLA EN LA UNIDAD DE EQUIPO ES FUGA, UNA CAUSA MÁS, ORIENTADA A LA CAUSA INMEDIATA DEBE SER USADA PARA EL ÍTEM MANTENIBLE.
C-M2	DESALINEAMIENTO.	MECÁNICAS	FALLA CAUSADA POR DISTANCIAS DE SEPARACIÓN O ALINEAMIENTO
C-M3	DEFORMACIÓN.	MECÁNICAS	FALLA POR DISTORSIÓN, DOBLAMIENTO, ABOLLADURA, TORCEDURA, ESTIRAMIENTO, CORVADO, ENCOGIMIENTO, DERRETIDO, ETC.
C-M4	SUELTO.	MECÁNICAS	FALLA POR DESCONEXIÓN
C-M5	FUGAS POR EMPAQUETADURA (O-RING/SELLO), ACOPLER	MECÁNICAS	UNIONES DE ACOPLER CON FUGAS SELLOS EMPAQUETADURAS CRISTALIZADOS DETERIORAROS
C-M6	ROTURA TUBERIA-	MECÁNICAS	DESACOPAMIENTO DE TUBERÍA FUGAS POR ROTURAS
C-M7	OBSTRUCCIÓN DE CONDUCTOS.	MECÁNICAS	SEDIMENTACIÓN, CONTAMINACIÓN
C-M8	SOBREPRESIÓN.	MECÁNICAS	
C-M9	CAVITACIÓN.	MECÁNICAS	FALLA RELACIONADA CON VÁLVULAS Y BOMBAS
VIB C-M10	VIBRACIÓN.	MECÁNICAS/NORMA ISO 14226	FALLA POR VIBRACIÓN ANORMAL
C-M11	CRISTALIZACION	MECÁNICAS	
C-M12	ROZAMIENTO	MECÁNICAS	

Fuente: Autores

Tabla 14. Estándar Causas de falla (2)

CAUSA DE FALLAS			
Código	Modo de Falla	Norma/Área	Descripción
C-MAT1	CORROSIÓN.	MATERIAL	FALLA POR CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA Y QUÍMICA
C-MAT2	EROSIÓN.	MATERIAL	FALLA POR DESGASTE EROSIVO
C-MAT3	FRACTURA / AGRIETAMIENTO.	MATERIAL	FALLA POR GRIETAS, BRECHAS, RAJADURAS, ROMPIMIENTO
C-MAT4	DESGASTE.	MATERIAL	FALLA POR ROZAMIENTO, RAYADO, ROZAMIENTO, RASPADO, DESGASTE ABRASIVO O ADHESIVO
C-MAT5	FATIGA.	MATERIAL	FALLA CUANDO EL ROMPIMIENTO O FRACTURA PUEDE SER RECONOCIDA POR FATIGA
C-MAT6	FRACTURA	MATERIAL	
C-MAT7	QUEMADO.	MATERIAL	MATERIAL ESTALLADO, FUNDIDO, EXPLOTADO, ETC.
C-INST1	NO SEÑAL / IND / ALARMA	INSTRUMENTOS	NO SEÑAL, INDICACIÓN, ALARMA CUANDO SE ESPERABA
C-INST2	SEÑAL / IND / ALARMA INCORRECTO	INSTRUMENTOS	SEÑAL, INDICACIÓN, ALARMA ERRADA, PUEDE SER EQUIVOCADA, FALSA, INTERMITENTE, ARBITRARIA, OSCILANTE, ETC.
C-INST3	DESAJUSTADO	INSTRUMENTOS	PARÁMETROS FUERA DE AJUSTES, ERRORES DE CALIBRACIÓN, ETC.
C-E1	SOBRE-VOLTAJE	ELECTRICAS	SOBRECARGA EN EL SISTEMA O EQUIPO ALIMENTACIÓN POR ENCIMA DE LOS PARÁMETROS LÍMITES
C-MIS1	MISCELÁNEO	MISCELÁNEOS	FALLAS CON VARIAS CAUSAS. SE DEBE CODIFICAR SI LA CAUSA PREDOMINANTE NO SE ENCUENTRA.
C-MIS2	DESCONOCIDO	MISCELÁNEOS	FALLA INVESTIGADA PERO SIN CAUSA ENCONTRADA O MUY INCIERTA
SER	PROBLEMAS MENORES	NORMA ISO 14224	PROBLEMAS MENORES DE SERVICIO (SUCIEDAD, DECOLORACIÓN, PÉRDIDA DE PARTES, PINTURA)
NOO	NO DA SALIDA	NORMA ISO 14224	NO DA SALIDA

Fuente: Autores

4.4.1 Análisis Modos de Falla del Sistema de Dirección

Un Análisis Modos de Falla es una herramienta para identificar las posibles fallas que puede presentar un equipo en su operación, y sistemáticamente decidir sobre las acciones a tomar en el plan de mantenimiento.

Con base en el desglose Padre-Hijo se realizó el análisis de modos de falla para el sistema de dirección el cual se muestra en los Cuadros 1 al 7. En este análisis se describe la función de los equipos y componentes del sistema, sus condiciones operacionales, la falla funcional, el código del Modo de Falla (Tablas 9 a 14), el Modo de falla descrito como un síntoma del equipo, y una breve descripción de la causa del modo de falla.

Cuadro 1. Análisis Modos de falla Sistema de Dirección del camión EH5000 (1)

UBICACION	SISTEMA	EQUIPO	COMPONENTE	FUNCION	CONDICIONES OPERACIONALES	FALLA FUNCIONAL	CODIGO MODO DE FALLA	MODO DE FALLA (SÍNTOMAS)	DESCRIPCIÓN - CAUSA
CAMIÓN ELÉCTRICO EH5000	DIRECCIÓN								
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN		Contener el Aceite para la alimentación de la Bomba del Sistema de Dirección	Nivel Bajo: Menos de 40 galones Nivel Normal: 40 Galones Nivel Alto: 61 Galones	Los niveles de aceite dentro del Tanque no se mantienen dentro de los parámetros de operación entre 40 y 60 GL	STD	DEFICIENCIA ESTRUCTURAL	Superficie Exterior/Interior Fisurada, Rota - Dañada
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN		Contener el Aceite para la alimentación de la Bomba del Sistema de Dirección	Nivel Bajo: Menos de 40 galones Nivel Normal: 40 Galones Nivel Alto: 61 Galones	Los niveles de aceite dentro del Tanque no se mantienen dentro de los parámetros de operación entre 40 y 60 GL	ELU	FUGA FLUIDO SERV AUX	Empaquetaduras o sello de los Acoples Cristalizados, Dañados.
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	FILTRO RESPIRADERO	Separar partículas del ambiente hacia el aceite en el tanque hidráulico y evitar sobrepresiones en el tanque	Filtrar partículas > 23 micrones	No separa partículas > 23 micrones. No permite flujo de aire entre el ambiente y el tanque, ocasionando sobrepresión.	PLU	TAPONADO / OBSTRUIDO / ATASCADO	Filtro saturado, Alta concentración de material particulado en el ambiente.
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	MALLAS (Filtrante)	Filtrar partículas en el aceite antes que entren a la bomba	Filtrar > 10 micras/micrones	No filtra partículas mayores a 10 micras/micrones	PLU	TAPONADO / OBSTRUIDO / ATASCADO / AHOGADO	RESTRICCIONES DE FLUJO (OBSTRUIDO, TAPONADO)
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	LLAVES DE PASO	Abrir/Cerrar el paso de aceite entre el tanque y los puertos de succión de las bombas: dirección, levante y enfriamiento de frenos	Normalmente abiertas	No permite el flujo de aceite entre el tanque y los puertos de succión de las bombas de los sistemas hidráulicos del camión	ELU	FUGA FLUIDO SERV AUX	DAÑO EN LA EMPAQUETADURA (O-RING / SELLO), ACOPLES
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	LLAVES DE PASO	Abrir/Cerrar el paso de aceite hacia la entrada de las bombas: dirección, levante y enfriamiento de frenos	Normalmente abiertas	La llave se cierra durante la operación del camión	FTC	FALLA PARA CERRAR	((IEXT1) CONTAMINACIÓN Falla por Contaminación en la Superficie, acumulación de barro en el brazo accionador
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	MANGUERAS DE RETORNO	Permitir flujo de aceite y establecer conexión entre el puerto de entrada del tanque con las líneas de retorno de los sistemas hidráulicos del camión	24horas/7dias	NO conecta el puerto de entrada del tanque de aceite hidráulico con las líneas de retorno de los sistemas hidráulicos del camión	ELP	FUGA FLUIDO DE PROCESO	((I47) CRISTALIZACIÓN Empaquetaduras o sello de los Acoples Cristalizados, Mangueras / desgaste por vida útil
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	MANGUERAS DE RETORNO	Permitir flujo de aceite y establecer conexión entre el puerto de entrada del tanque con las líneas de retorno de los sistemas hidráulicos del camión	24horas/7dias	NO contiene el aceite	BRD	PARADA POR ROTURA	I45 -SOBREPRESIÓN - Aumento de la Presión en las etapas de Succión // Ductos fisurado
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	MANGUERAS DE RETORNO	Permitir flujo de aceite y establecer conexión entre el puerto de entrada del tanque con las líneas de retorno de los sistemas hidráulicos del camión	24horas/7dias	NO conecta el puerto de entrada del tanque de aceite hidráulico con las líneas de retorno de los sistemas hidráulicos del camión	ELU	FUGA FLUIDO SERV AUX	((I48) ROZAMIENTO (Roce entre mangueras por mal enrutamiento o vibración del equipo)

Fuente: Autores

Cuadro 2. Análisis Modos de falla Sistema de Dirección del camión EH5000 (2)

UBICACION	SISTEMA	EQUIPO	COMPONENTE	FUNCION	CONDICIONES OPERACIONALES	FALLA FUNCIONAL	CODIGO MODO DE FALLA	MODO DE FALLA (SINTOMAS)	DESCRIPCIÓN - CAUSA
CAMIÓN ELÉCTRICO EH500	DIRECCIÓN								
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	MANGUERAS DE SUCCIÓN	Permitir flujo de Aceite y establecer Conexión herméticamente entre el Tanque de aceite y el puerto de succión de la bomba de dirección	24horas/7días	NO Conecta herméticamente el Puerto de Salida del tanque de aceite Hidráulico con la Succión de la Bomba de Dirección	ELP	FUGA FLUIDO DE PROCESO	(147) CRISTALIZACIÓN Empaquetaduras o sello de los Acoples Cristalizados, Mangueras / desgaste por vida útil
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	MANGUERAS DE SUCCIÓN	Permitir flujo de Aceite y establecer Conexión herméticamente entre el Tanque de aceite y el puerto de succión de la bomba de dirección	24horas/7días	NO Conecta herméticamente el Puerto de Salida del tanque de aceite Hidráulico con la Succión de la Bomba de Dirección	BRD	PARADA POR ROTURA	145-SOBREPRESIÓN - Aumento de la Presión en las etapas de Succión // Ductos fisurado
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	MANGUERAS DE SUCCIÓN	Permitir flujo de Aceite y establecer Conexión herméticamente entre el Tanque de aceite y el puerto de succión de la bomba de dirección	24horas/7días	NO Conecta herméticamente el Puerto de Salida del tanque de aceite Hidráulico con la Succión de la Bomba de Dirección	ELU	FUGA FLUIDO SERV AUX	(148) ROZAMIENTO (Roce entre mangueras por mal enrutamiento o vibración del equipo)
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	SENSOR TEMPERATURA ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	Medir la temperatura del aceite hidráulico que está en el tanque	40°C < Temp < 80°C	No mide la temperatura de aceite hidráulico que está en el tanque	AIR	LECTURA ANORMAL DE INSTRUMENTO	(C-INST3) DESAJUSTADO - Pérdida de los Patrones y Parámetros de Medición del Instrumento
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	SENSOR TEMPERATURA ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	Medir la temperatura del aceite hidráulico que está en el tanque	40°C < Temp < 80°C	No mide la temperatura de aceite hidráulico que está en el tanque	FOV	VOLTAJE DE SALIDA / ENTRADA - ALTO/BAJO	(E4) FALLA SUMINISTRO DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA - Falso Contacto en los Terminales
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	SENSOR TEMPERATURA ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	Medir la temperatura del aceite hidráulico que está en el tanque	40°C < Temp < 80°C	No mide la temperatura de aceite hidráulico que está en el tanque	FTP	FALLA EN FUNCIONAMIENTO CUANDO ES REQUERIDO	NO SEÑAL / IND / ALARMA - No hay señal de alarma de salida del instrumento
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	SENSOR TEMPERATURA ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	Medir la temperatura del aceite hidráulico que está en el tanque	40°C < Temp < 80°C	No mide la temperatura de aceite hidráulico que está en el tanque	ERO	SALIDA ERRADA	(E-CONT2) FALLA CABLEADO - CONEXIÓN - Alimentación de Energía no llega al Instrumento (Cables sulfatados sin continuidad) (E2 Circuito abierto)
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	ACEITE HIDRÁULICO	Fluir SIN OBSTRUCCIÓN dentro del sistema para cumplir la función de girar las llantas delanteras de manera silenciosa y cuando el operador lo requiera según el sentido al cual se dirige	-18°C a 45°C // Viscosidad óptima 16-40cSt	No fluye libremente dentro del sistema para cumplir la función de girar las llantas delanteras de manera silenciosa y cuando el operador lo requiera según el sentido al cual se dirige	OHE	SOBRECALENTAMIENTO	PERDIDA DE LAS PROPIEDADES DE LOS PAQUETES ADITIVOS DEL ACEITE
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	ACEITE HIDRÁULICO	Fluir SIN OBSTRUCCIÓN dentro del sistema para cumplir la función de girar las llantas delanteras de manera silenciosa y cuando el operador lo requiera según el sentido al cual se dirige	-18°C a 45°C // Viscosidad óptima 16-40cSt	No fluye libremente dentro del sistema para cumplir la función de girar las llantas delanteras de manera silenciosa y cuando el operador lo requiera según el sentido al cual se dirige	IEXT1	CONTAMINACIÓN	Mezcla de fluido entre sistemas hidráulicos

Fuente: Autores

Cuadro 3. Análisis Modos de falla Sistema de Dirección del camión EH5000 (3)

UBICACION	SISTEMA	EQUIPO	COMPONENTE	FUNCION	CONDICIONES OPERACIONALES	FALLA FUNCIONAL	CODIGO MODO DE FALLA	MODO DE FALLA (SÍNTOMAS)	DESCRIPCIÓN - CAUSA
CAMIÓN ELÉCTRICO EH500	DIRECCIÓN								
		BOMBA DE DIRECCIÓN		Generar flujo de aceite hidráulico para el funcionamiento del sistema de dirección y suministro de aceite para otros sistemas hidráulicos	250 L/min @ 1900RPM - Presión de trabajo 3000psi Presión standby 500psi	No genera flujo de aceite hidráulico a una tasa de 250L/min @1900rpm	C-M9	CAVITACIÓN	M4 Bajo nivel de aceite hidráulico en el tanque. Insuficiente suministro de flujo.
		BOMBA DE DIRECCIÓN		Generar flujo de aceite hidráulico para el funcionamiento del sistema de dirección y suministro de aceite para otros sistemas hidráulicos	250 L/min @ 1900RPM - Presión de trabajo 3000psi Presión standby 500psi	El sistema no alcanza una presión de trabajo de 3000 psi	BRD	PARADA POR ROTURA	STD- Deficiencia estructural - fisuras internas en la bomba
		BOMBA DE DIRECCIÓN		Generar flujo de aceite hidráulico para el funcionamiento del sistema de dirección y suministro de aceite para otros sistemas hidráulicos	250 L/min @ 1900RPM - Presión de trabajo 3000psi Presión standby 500psi	El sistema no alcanza una presión de trabajo de 3000 psi	C-M2	DESALINEADO	VIB C-M10 - VIBRACIÓN
		BOMBA DE DIRECCIÓN		Generar flujo de aceite hidráulico para el funcionamiento del sistema de dirección y suministro de aceite para otros sistemas hidráulicos	250 L/min @ 1900RPM - Presión de trabajo 3000psi Presión standby 500psi	El sistema no alcanza una presión de trabajo de 3000 psi	M1	PERDIDA DE PRESION EN EL SISTEMA	(ELP) FUGA FLUIDO DE PROCESO
		BOMBA DE DIRECCIÓN		Generar flujo de aceite hidráulico para el funcionamiento del sistema de dirección y suministro de aceite para otros sistemas hidráulicos	250 L/min @ 1900RPM - Presión de trabajo 3000psi Presión standby 500psi	El sistema alcanza una presión de trabajo >3000psi	M6	SOBREPRESIÓN	(PLU)TAPONADO / OBSTRUIDO / ATASCADO DE MANGUERAS, MULTIPLES
		BOMBA DE DIRECCIÓN	BLOQUE VÁLVULA COMPENSADORA	Regular la presión de trabajo y el ciclo de standby para la operación de la bomba de dirección	P trabajo 3000psi P standby 500psi	No regula los parámetros de presión para la operación de los ciclos de la bomba	FTR	NO REGULA LOS CICLOS DE OPERACIÓN DE LA BOMBA	C-INST3 BLOQUE VÁLVULAS DESAJUSTADAS
		BOMBA DE DIRECCIÓN	BLOQUE VÁLVULA COMPENSADORA	Regular la presión de trabajo de 3000 psi y el ciclo de standby de 600psi para la operación de la bomba de dirección	P trabajo 3000psi P standby 500psi	No regula los parámetros de presión para la operación de los ciclos de la bomba	FTR	NO REGULA LOS CICLOS DE OPERACIÓN DE LA BOMBA	LBP - BAJA PRESIÓN DE ACEITE QUE PILOTEA EL BLOQUE COMPENSADOR
		BOMBA DE DIRECCIÓN	BLOQUE VÁLVULA COMPENSADORA	Regular la presión de trabajo de 3000 psi y el ciclo de standby de 600psi para la operación de la bomba de dirección	P trabajo 3000psi P standby 500psi	No regula los parámetros de presión para la operación de los ciclos de la bomba	FTR	NO REGULA LOS CICLOS DE OPERACIÓN DE LA BOMBA	INL- FUGA INTERNA DE ACEITE EN EL BLOQUE COMPENSADOR
		BOMBA DE DIRECCIÓN	BLOQUE VÁLVULA COMPENSADORA	Regular la presión de trabajo de 3000 psi y el ciclo de standby de 600psi para la operación de la bomba de dirección	P trabajo 3000psi P standby 500psi	No regula los parámetros de presión para la operación de los ciclos de la bomba	ELP	FUGA FLUIDO DE PROCESO	C-M5 - Fugas por O-rings UNIONES DE ACOPLES CON FUGAS SELLOS EMPAQUETADURAS CRISTALIZADOS DETERIORADOS
		BOMBA DE DIRECCIÓN	BLOQUE VÁLVULA COMPENSADORA	Regular la presión de trabajo de 3000 psi y el ciclo de standby de 600psi para la operación de la bomba de dirección	P trabajo 3000psi P standby 500psi	No regula los parámetros de presión para la operación de los ciclos de la bomba	ELP	FUGA FLUIDO DE PROCESO	C-MAT3 - FRACTURA: Falla por grietas, brechas, rajaduras, rompimiento,

Fuente: Autores

Cuadro 4. Análisis Modos de falla Sistema de Dirección del camión EH5000 (4)

UBICACION	SISTEMA	EQUIPO	COMPONENTE	FUNCION	CONDICIONES OPERACIONALES	FALLA FUNCIONAL	CODIGO MODO DE FALLA	MODO DE FALLA (SÍNTOMAS)	DESCRIPCIÓN - CAUSA
CAMION ELÉCTRICO EH500	DIRECCIÓN								
		FILTRO HIDRÁULICO DE ALTA PRESIÓN		Filtrar partículas > 6 micrones		No filtra partículas > 6 micrones	PLU	TAPONADO / OBSTRUIDO / ATASCADO / AHOGADO	Filtro saturado RESTRICCIONES DE FLUJO (OBSTRUIDO, TAPONADO)
		VÁLVULA R.C.B		Distribuir el flujo de aceite hidráulico que viene de la bomba de dirección hacia los demás sistemas hidráulicos del camión	Presión aceite 3000 psi	No permite la distribución del flujo de aceite hidráulico que viene de la bomba de dirección hacia los demás sistemas hidráulicos del camión	PLU	TAPONADO / OBSTRUIDO / ATASCADO / AHOGADO	RESTRICCIONES DE FLUJO (OBSTRUIDO, TAPONADO)
		VÁLVULA R.C.B		Distribuir el flujo de aceite hidráulico que viene de la bomba de dirección hacia los demás sistemas hidráulicos del camión	Presión aceite 3000 psi	No permite la distribución del flujo de aceite hidráulico que viene de la bomba de dirección hacia los demás sistemas hidráulicos del camión	INL	FUGA INTERNA	C-MAT3 - FRACTURA/AGRIETAMIENTO O DEL BLOQUE VÁLVULA RCB
		VÁLVULA R.C.B		Distribuir del flujo de aceite hidráulico a la v/v amplificadora de flujo y a los acumuladores de dirección	P aceite 3000 psi		M6	FUGA EXTERNA	C-M5 FUGA POR EMPAQUETADURAS - O-RINGS - MANGUERAS
		VÁLVULA R.C.B		Permitir la descarga a tanque de las líneas de retorno que llegan de los otros sistemas hidráulicos del camión	24horas/7días	No permite la descarga a tanque	PLU	TAPONADO / OBSTRUIDO / ATASCADO / AHOGADO	CONDUCTOS OBSTRUIDOS DENTRO DEL BLOQUE POR LA ACCIÓN DE VÁLVULAS INTERNAS
		VÁLVULA R.C.B		Permitir la descarga a tanque de las líneas de retorno que llegan de los otros sistemas hidráulicos del camión	24horas/7días	No permite la descarga a tanque	ELP	FUGA FLUIDO SERV AUX	C-M5 FUGA POR EMPAQUETADURAS - O-RINGS - MANGUERAS
		VÁLVULA R.C.B	TRANSDUCTOR DE PRESIÓN DE DIRECCIÓN/FRENO	Sensar la presión del sistema de dirección y transmitir la señal eléctrica al sistema de control del camión	2000 psi < P < 5000 psi	No sensa la presión del sistema de dirección ni transmite la señal eléctrica al sistema de control del camión	C-INST1	NO SEÑAL / IND / ALARMA	PTF- FALLA TRANSMISIÓN SEÑAL/POTENC (Falla en la alimentación de voltaje del sensor)
		VÁLVULA R.C.B	TRANSDUCTOR DE PRESIÓN DE DIRECCIÓN/FRENO	Sensar la presión del sistema de dirección y transmitir la señal eléctrica al sistema de control del camión	2000 psi < P < 5000 psi	No sensa la presión del sistema de dirección ni transmite la señal eléctrica al sistema de control del camión	AIR	LECTURA ANORMAL DE INSTRUMENTO.	C-INST3-DESAJUSTADO - El sensor defectuoso de fábrica - afectado por sobrepresiones en el sistema
		VÁLVULA R.C.B	TRANSDUCTOR DE PRESIÓN DE DIRECCIÓN/FRENO	Sensar la presión del sistema de dirección y transmitir la señal eléctrica al sistema de control del camión	2000 psi < P < 5000 psi	No sensa la presión del sistema de dirección ni transmite la señal eléctrica al sistema de control del camión	C-INST1	NO SEÑAL / IND / ALARMA	E-CONT2 Falla de cableado - cables sueltos // E2 Circuito abierto
		VÁLVULA R.C.B	VALVULA CHECK	Bloquear el flujo de aceite de los acumuladores hacia la bomba de dirección	P ≤ 3000 psi	Permite el flujo de aceite de los acumuladores hacia la bomba de dirección	M1	PERDIDA DE PRESION EN EL SISTEMA	LCP- FUGA EN POSICIÓN CERRADA // M6 - SOBREPRESIÓN
		VÁLVULA R.C.B	VALVULA CHECK	Bloquear el flujo de aceite de los acumuladores hacia la bomba de dirección	P ≤ 3000 psi	Permite el flujo de aceite de los acumuladores hacia la bomba de dirección	M1	PERDIDA DE PRESION EN EL SISTEMA.	LCP- FUGA EN POSICIÓN CERRADA // C-M5 FUGA POR EMPAQUETADURAS - O-RINGS - MANGUERAS

Fuente: Autores

Cuadro 5. Análisis Modos de falla Sistema de Dirección del camión EH5000 (5)

UBICACION	SISTEMA	EQUIPO	COMPONENTE	FUNCION	CONDICIONES OPERACIONALES	FALLA FUNCIONAL	CODIGO MODO DE FALLA	MODO DE FALLA (SINTOMAS)	DESCRIPCIÓN - CAUSA
CAMION ELÉCTRICO EH500	DIRECCIÓN								
		VÁLVULA R.C.B	VALVULA DE ALIVIO SECUNDARIO	Liberar a tanque la presión del sistema hidráulico cuando P >3200+/-25 psi	P >3200 +/-25 psi	No libera a tanque la presión del sistema hidráulico a P>3200+/-25psi	C-M8	SOBREPRESIÓN	C-INST3-DESAJUSTADO - Válvula descalibrada
		VÁLVULA R.C.B	VALVULA DE ALIVIO SECUNDARIO	Liberar a tanque la presión del sistema hidráulico cuando P >3200+/-25 psi	P >3200 +/-25 psi	No libera a tanque la presión del sistema hidráulico a P>3200+/-25psi	C-M9	SOBREPRESIÓN	PLU - TAPONAMIENTO/OBSTRUCCIÓN CONDUCTOS
		VÁLVULA R.C.B	VALVULA DE ALIVIO SECUNDARIO	Liberar a tanque la presión del sistema hidráulico cuando P >3200+/-25 psi	P >3200 +/-25 psi	Libera a tanque a una P<3000 PSI	M1	PERDIDA DE PRESION EN EL SISTEMA	LCP- FUGA EN POSICIÓN CERRADA
		VÁLVULA R.C.B	SOLENOIDE DE DESCARGA DE LOS ACUMULADORES DE DIRECCIÓN	Permitir la descarga a tanque de los acumuladores de dirección cuando el camión se apaga.	24V - ON - Descarga a Tanque	No libera a tanque la presión en los acumuladores cuando se apaga el camión	C3	FALLA PROTECCIÓN DEL EQUIPO	E-CONT2 Falla de cableado - cables sueltos - La solenoide no se energiza // E2 Circuito abierto // Bobina de la solenoide abierta/quemada
		VÁLVULA R.C.B	SOLENOIDE DE DESCARGA DE LOS ACUMULADORES DE DIRECCIÓN	Permitir la descarga a tanque de los acumuladores de dirección cuando el camión se apaga.	24V - ON - Descarga a Tanque	No libera a tanque la presión en los acumuladores cuando se apaga el camión	M1	PERDIDA DE PRESION EN EL SISTEMA	LCP-Fuga en posición cerrada, cuando la válvula está desenergizada
		VÁLVULA R.C.B	SOLENOIDE DE DESCARGA DE LOS ACUMULADORES DE DIRECCIÓN	Permitir la descarga a tanque de los acumuladores de dirección cuando el camión se apaga.	24V - ON - Descarga a Tanque	No libera a tanque la presión en los acumuladores cuando se apaga el camión	IEXT1	CONTAMINACIÓN	PLU - TAPONAMIENTO/OBSTRUCCIÓN CONDUCTOS
		ACUMULADORES DE DIRECCION		Almacenar aceite y proporcionar aceite a presión al sistema de dirección en caso que se presente una falla	P precarga nitrogeno=1200 psi P aceite =3000 psi	No almacena aceite y no proporciona aceite a presión al sistema de caso de falla	M1	PERDIDA DE PRESION EN EL SISTEMA	INL - (C-M5) -FUGAS POR EMPAQUETADURA- SELLOS INTERNOS ROTOS EN EL ACUMULADOR - NO HAY DIFERENCIA DE PRESIÓN-LA PRECARGA SE PIERDE
		ACUMULADORES DE DIRECCION	TRANSDUCTOR DE PRESIÓN DEL ACUMULADOR	Sensar la presión del acumulador dirección y transmitir la señal eléctrica al sistema de control del camión	En operación 1200 psi < P ≥ 3000 psi Reposo P=1200 psi	No sensa la presión del acumulador de dirección ni transmite la señal eléctrica al sistema de control del camión	C-INST1	NO SEÑAL / IND / ALARMA	PTF- Falla en la alimentación de voltaje del sensor
		ACUMULADORES DE DIRECCION	TRANSDUCTOR DE PRESIÓN DEL ACUMULADOR	Sensar la presión del acumulador dirección y transmitir la señal eléctrica al sistema de control del camión	En operación 1200 psi < P ≥ 3000 psi Reposo P=1200 psi	No sensa la presión del acumulador de dirección ni transmite la señal eléctrica al sistema de control del camión	C-INST1	NO SEÑAL / IND / ALARMA	E-CONT2 Falla de cableado - cables sueltos // E2 Circuito abierto
		ACUMULADORES DE DIRECCION	TRANSDUCTOR DE PRESIÓN DEL ACUMULADOR	Sensar la presión del acumulador dirección y transmitir la señal eléctrica al sistema de control del camión	En operación 1200 psi < P ≥ 3000 psi Reposo P=1200 psi	No sensa la presión del acumulador de dirección ni transmite la señal eléctrica al sistema de control del camión	AIR	LECTURA ANORMAL DE INSTRUMENTO	C-INST3-DESAJUSTADO - El sensor descalibrado, error en la señal de lectura

Fuente: Autores

Cuadro 6. Análisis Modos de falla Sistema de Dirección del camión EH5000 (6)

UBICACION	SISTEMA	EQUIPO	COMPONENTE	FUNCION	CONDICIONES OPERACIONALES	FALLA FUNCIONAL	CODIGO MODO DE FALLA	MODO DE FALLA (SINTOMAS)	DESCRIPCIÓN - CAUSA
CAMION ELÉCTRICO EH500	DIRECCIÓN								
		VÁLVULA AMPLIFICADORA DE FLUJO		Recibir flujo de aceite desde la válvula RCB.	P aceite = 3000psi	No recibe aceite de la válvula RCB	M6	FUGA EXTERNA	C-M6 - Rotura de tubería-manguera entre RCB y la válvula amplificadora de flujo
		VÁLVULA AMPLIFICADORA DE FLUJO		Amplificar flujo de aceite a 40 GPM para aumentar la velocidad de salida de los vástagos de los cilindros de dirección.	Flujo a 40 GPM	No amplifica flujo de aceite	C-M7	OBSTRUCCIÓN DE CONDUCTOS	IEXT1 - Contaminación del aceite hidráulico
		VÁLVULA AMPLIFICADORA DE FLUJO		Amplificar flujo de aceite a 40 GPM para aumentar la velocidad de salida de los vástagos de los cilindros de dirección.	Flujo a 40 GPM	No amplifica flujo de aceite	INL	FUGA INTERNA	C-M5 -Empaquetadura -Orings rotos
		VÁLVULA AMPLIFICADORA DE FLUJO		Amplificar flujo de aceite a 40 GPM para aumentar la velocidad de salida de los vástagos de los cilindros de dirección.	Flujo a 40 GPM	No amplifica flujo de aceite	INL	FUGA INTERNA	C-MAT3 -Fractura, agrietamiento interno del bloque de la válvula
		VÁLVULA AMPLIFICADORA DE FLUJO		Direccionar el flujo de aceite desde la bomba principal hacia la válvula orbitrol.	P aceite = 3000psi	No direcciona el flujo de aceite hacia la válvula orbitrol	C-M7	OBSTRUCCIÓN DE CONDUCTOS	IEXT1 - Contaminación del aceite hidráulico
		VÁLVULA AMPLIFICADORA DE FLUJO		Direccionar el flujo de aceite desde la bomba principal hacia la válvula orbitrol.	P aceite = 3000psi	No direcciona el flujo de aceite hacia la válvula orbitrol	M6	FUGA EXTERNA	C-M6 - Rotura de tubería-manguera ente válvula amplificadora y válvula orbitrol
		VÁLVULA AMPLIFICADORA DE FLUJO	VÁLVULA ANTICHOCK	Permitir la descarga del sistema hacia tanque cuando la presión sobrepase 3600 PSI		No permite la descarga del sistema hacia tanque cuando la presión llega a 3600 PSI	INL	FUGA INTERNA	C-MAT4 - Desgaste del componente (sello /asiento)
		VÁLVULA AMPLIFICADORA DE FLUJO	VÁLVULA ANTICHOCK	Permitir la descarga del sistema hacia tanque cuando la presión sobrepase 3600 PSI		No permite la descarga del sistema hacia tanque cuando la presión llega a 3600 PSI	C-M8	SOBREPRESIÓN	PLU- Válvula taponada /obstruida
		VÁLVULA AMPLIFICADORA DE FLUJO	CARTUCHO AMPLIFICADOR DE FLUJO	Amplificar flujo de aceite a 40 GPM para aumentar la velocidad de salida de los vástagos de los cilindros de dirección.	Flujo a 40 GPM	No amplifica flujo de aceite	C-M7	OBSTRUCCIÓN DE CONDUCTOS INTERNOS DEL CARTUCHO	IEXT1 - Contaminación del aceite hidráulico
		VÁLVULA AMPLIFICADORA DE FLUJO	CARTUCHO AMPLIFICADOR DE FLUJO	Amplificar flujo de aceite a 40 GPM para aumentar la velocidad de salida de los vástagos de los cilindros de dirección.	Flujo a 40 GPM	No amplifica flujo de aceite	INL	FUGA INTERNA	C-M5 -Empaquetadura -Orings rotos
		VÁLVULA AMPLIFICADORA DE FLUJO	CARTUCHO DIRECCIONAL	Recibir la señal hidráulica piloto de dirección enviada por la válvula orbitrol.	P aceite = 3000psi	La válvula amplificadora no recibe la señal de dirección enviada por la válvula orbitrol	C-M7	OBSTRUCCIÓN DE CONDUCTOS.	IEXT1 - Contaminación del aceite hidráulico
		VÁLVULA AMPLIFICADORA DE FLUJO	CARTUCHO DIRECCIONAL	Recibir la señal hidráulica piloto de dirección enviada por la válvula orbitrol.	P aceite = 3000psi	La válvula amplificadora no recibe la señal de dirección enviada por la válvula orbitrol	M6	FUGA EXTERNA	C-M6 - Rotura de tubería-manguera entre válvula amplificadora y válvula orbitrol

Fuente: Autores

Cuadro 7. Análisis Modos de falla Sistema de Dirección del camión EH5000 (7)

UBICACION	SISTEMA	EQUIPO	COMPONENTE	FUNCION	CONDICIONES OPERACIONALES	FALLA FUNCIONAL	CODIGO MODO DE FALLA	MODO DE FALLA (SINTOMAS)	DESCRIPCIÓN - CAUSA
CAMION ELÉCTRICO EH500	DIRECCIÓN								
		VÁLVULA AMPLIFICADORA DE FLUJO	MANGUERA RETORNO	Conectar el puerto de entrada del tanque de aceite hidráulico con la línea de retorno de la válvula amplificadora	24horas/7días Presion de flujo de trabajo de las manguera xx psi	No conecta el puerto de entrada del tanque de aceite hidráulico con la línea de retorno de la válvula amplificadora	ELP	FUGA FLUIDO DE PROCESO	(I47)CRISTALIZACIÓN Empaquetaduras o sello de los Acoples Cristalizados, Mangueras / desgaste por vida útil
		VÁLVULA AMPLIFICADORA DE FLUJO	MANGUERA RETORNO	Conectar el puerto de entrada del tanque de aceite hidráulico con la línea de retorno de la válvula amplificadora	24horas/7días Presion de flujo de trabajo de las manguera xx psi	NO contiene el aceite	BRD	PARADA POR ROTURA	I45 -SOBREPRESIÓN - Aumento de la Presión en las etapas de Succión // Ductos fisurados
		VÁLVULA AMPLIFICADORA DE FLUJO	MANGUERA RETORNO	Conectar el puerto de entrada del tanque de aceite hidráulico con la línea de retorno de la válvula amplificadora	24horas/7días Presion de flujo de trabajo de las manguera xx psi	No conecta el puerto de entrada del tanque de aceite hidráulico con la línea de retorno de la válvula amplificadora	ELU	FUGA FLUIDO SERV AUX	(I48) ROZAMIENTO (Roce entre mangueras por mal enrutamiento o vibración del equipo)
		COLUMNA DE DIRECCION		Transmitir el movimiento que produce el giro del volante, hacia la válvula orbitrol		No transmite el movimiento que produce el giro del volante hacia la válvula orbitrol	FRO	FALLA ANTE LA SOLICITUD DE GIRAR	M3 Falla de lubricación
		COLUMNA DE DIRECCION		Transmitir el movimiento que produce el giro del volante, hacia la válvula orbitrol		No transmite el movimiento que produce el giro del volante hacia la válvula orbitrol	FRO	FALLA ANTE LA SOLICITUD DE GIRAR	C-MAT4 - Desgaste por fricción
		COLUMNA DE DIRECCION	VALVULA CONTROL DE LA DIRECCIÓN "ORBITROL"	Direccionar el flujo al cartucho de dirección de la v/v amplificadora de acuerdo al sentido de giro	p= 3000 psi	No direcciona el flujo de aceite hacia el cartucho direccional de la válvula amplificadora de flujo	C-M7	OBSTRUCCIÓN DE CONDUCTOS	IEXT1 - Contaminación del aceite hidráulico
		COLUMNA DE DIRECCION	VALVULA CONTROL DE LA DIRECCIÓN "ORBITROL"	Direccionar el flujo al cartucho de dirección de la v/v amplificadora de acuerdo al sentido de giro	p= 3000 psi	No direcciona el flujo de aceite hacia el cartucho direccional de la válvula amplificadora de flujo	INL	FUGA INTERNA	C-M5 -Empaquetadura -Orings rotos
		COLUMNA DE DIRECCION	VALVULA CONTROL DE LA DIRECCIÓN "ORBITROL"	Direccionar el flujo al cartucho de dirección de la v/v amplificadora de acuerdo al sentido de giro	p= 3000 psi	No direcciona el flujo de aceite hacia el cartucho direccional de la válvula amplificadora de flujo	INL	FUGA INTERNA	C-MAT3 -Fractura, agrietamiento interno de la válvula orbitrol
		MULTIPLE DISTRIBUIDOR		Distribuir el flujo de aceite que viene de la válvula amplificadora hacia los cilindros de dirección	p=3000 psi	No distribuye flujo de aceite	INL	FUGA INTERNA	C-MAT3 -Fractura, agrietamiento interno del bloque
		MULTIPLE DISTRIBUIDOR		Distribuir el flujo de aceite que viene de la válvula amplificadora hacia los cilindros de dirección	p=3000 psi	No distribuye flujo de aceite	M6	FUGA EXTERNA	C-M5 -Empaquetadura -Orings rotos
		MULTIPLE DISTRIBUIDOR		Distribuir el flujo de aceite que viene de la válvula amplificadora hacia los cilindros de dirección	p=3000 psi	No distribuye flujo de aceite	M6	FUGA EXTERNA	C-M6 - Rotura de tubería-manguera entre válvula amplificadora y válvula orbitrol
		CILINDROS	MANGUERA	Permitir el giro de las llantas según el sentido de giro (izquierdo/derecho) de la dirección	P 3000 psi	No permite el giro de las llantas según el sentido de giro de la dirección	M6	FUGA EXTERNA	C-M6 - Rotura de mangueras entre el múltiple de distribución y los cilindros
		CILINDROS		Permitir el giro de las llantas según el sentido de giro (izquierdo/derecho) de la dirección	P 3000 psi	No permite el giro de las llantas según el sentido de giro de la dirección	STD	DEFICIENCIA ESTRUCTURAL	Superficie Exterior/Interior Fisurada, Rota - Dañada
		CILINDROS		Permitir el giro de las llantas según el sentido de giro (izquierdo/derecho) de la dirección	P 3000 psi	No permite el giro de las llantas según el sentido de giro de la dirección	INL	FUGA INTERNA	C-M5 -Empaquetadura -Orings rotos dentro del cilindro
		CILINDROS		Permitir el giro de las llantas según el sentido de giro (izquierdo/derecho) de la dirección	P 3000 psi	No permite el giro de las llantas según el sentido de giro de la dirección	INL	FUGA INTERNA	C-MAT4 - Desgaste de las paredes internas del cilindro por la acción repetitiva de entrada y salida del vástago

Fuente: Autores

4.4.2 Criticidad de los Modos de Falla de equipos/componentes críticos

A partir del Análisis de los modos de falla, se determinó la criticidad de aquellos modos de falla de los equipos y componentes que fueron identificados como críticos en desglose Padre-Hijo que se mostró en la Tabla 8.

En los Cuadros 8, 9 y 10 se puede ver la evaluación de los modos de falla de los siguientes equipos del sistema: el tanque hidráulico, la bomba de dirección, los acumuladores, la válvula orbitrol y las mangueras del sistema. Para hacerlo se tomaron los valores de ponderación descritos en la sección 4.2

Los modos de falla que resultaron críticos fueron: El sobrecalentamiento del Aceite Hidráulico, La cavitación de la bomba de dirección, Partida por rotura de la bomba de dirección y Fugas internas en la válvula Orbitrol (Ver Figura 34).

Figura 34. Resumen Modos de falla Críticos

EQUIPO	COMPONENTE	CODIGO MODO DE FALLA	MODO DE FALLA (SÍNTOMAS)	DESCRIPCIÓN - CAUSA	FRECUENCIA	IMPACTO/CONSECUENCIA					IMPACTO	CRITICIDAD DE LA FALLA
						Seguridad del Personal	Seguridad del Equipo	Medio Ambiente	Económicos	Mantenimiento		
						10%	10%	10%	40%	30%		
											0	0
TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	ACEITE HIDRÁULICO	OHE	SOBRECALENTAMIENTO	PERDIDA DE LAS PROPIEDADES DE LOS PAQUETES ADITIVOS DEL ACEITE	10	1	5	1	5	5	4,2	42
BOMBA DE DIRECCIÓN		C-M9	CAVITACIÓN	M4 Bajo nivel de aceite hidráulico en el tanque. Insuficiente suministro de flujo.	7	1	1	1	5	5	3,8	26,6
BOMBA DE DIRECCIÓN		BRD	PARADA POR ROTURA	STD- Deficiencia estructural - fisuras internas en la bomba	7	1	1	1	5	5	3,8	26,6
COLUMNA DE DIRECCION	VALVULA CONTROL DE LA DIRECCIÓN "ORBITROL"	INL	FUGA INTERNA	C-M5 -Empaquetadura - Orings rotos	10	1	3	3	3	3	2,8	28
COLUMNA DE DIRECCION	VALVULA CONTROL DE LA DIRECCIÓN "ORBITROL"	INL	FUGA INTERNA	C-MAT3 -Fractura, agrietamiento interno de la válvula orbitrol	7	1	3	1	5	5	4	28

Fuente: Autores

Cuadro 8. Criticidad Modos de Falla (1)

UBICACION	SISTEMA	EQUIPO	COMPONENTE	CODIGO MODO DE FALLA	MODO DE FALLA (SÍNTOMAS)	DESCRIPCIÓN - CAUSA	FRECUENCIA	IMPACTO/CONSECUENCIA					IMPACTO	CRITICIDAD DE LA FALLA
								Seguridad del Personal	Seguridad del Equipo	Medio Ambiente	Económicos	Mantenimiento		
								10%	10%	10%	40%	30%		
CAMION ELÉCTRICO EH500	DIRECCIÓN											0	0	
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN		STD	DEFICIENCIA ESTRUCTURAL	Superficie Exterior/Interior Fisurada, Rota - Dañada	5	1	1	3	1	3	1,8	9
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN		ELU	FUGA FLUIDO SERV AUX	Empaquetaduras o sello de los Acoples Cristalizados, Dañados.	7	1	1	3	1	1	1,2	8,4
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	MANGUERAS DE RETORNO	ELP	FUGA FLUIDO DE PROCESO	(147) CRISTALIZACIÓN Empaquetaduras o sello de los Acoples Cristalizados, Mangueras / desgaste por vida útil	7	1	3	3	3	1	2,2	15,4
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	MANGUERAS DE RETORNO	BRD	PARADA POR ROTURA	145 -SOBREPRESIÓN - Aumento de la Presión en las etapas de Succión // Ductos fisurado	3	3	3	5	3	1	2,6	7,8
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	MANGUERAS DE RETORNO	ELU	FUGA FLUIDO SERV AUX	(148) ROZAMIENTO (Roce entre mangueras por mal enrutamiento o vibración del equipo)	3	1	1	3	3	1	2	6
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	MANGUERAS DE SUCCIÓN	ELP	FUGA FLUIDO DE PROCESO	(147) CRISTALIZACIÓN Empaquetaduras o sello de los Acoples Cristalizados, Mangueras / desgaste por vida útil	7	1	3	3	3	1	2,2	15,4
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	MANGUERAS DE SUCCIÓN	BRD	PARADA POR ROTURA	145-SOBREPRESIÓN - Aumento de la Presión en las etapas de Succión // Ductos fisurado	3	3	3	5	3	1	2,6	7,8
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	MANGUERAS DE SUCCIÓN	ELU	FUGA FLUIDO SERV AUX	(148) ROZAMIENTO (Roce entre mangueras por mal enrutamiento o vibración del equipo)	3	1	1	3	3	1	2	6

Fuente: Autores

Cuadro 9. Criticidad Modos de falla (2)

UBICACION	SISTEMA	EQUIPO	COMPONENTE	CODIGO MODO DE FALLA	MODO DE FALLA (SÍNTOMAS)	DESCRIPCIÓN - CAUSA	FRECUENCIA	IMPACTO/CONSECUENCIA					IMPACTO	CRITICIDAD DE LA FALLA
								Seguridad del Personal	Seguridad del Equipo	Medio Ambiente	Económicos	Mantenimiento		
								10%	10%	10%	40%	30%		
CAMION ELÉCTRICO EH500	DIRECCIÓN											0	0	
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	ACEITE HIDRÁULICO	OHE	SOBRECALENTAMIENTO	PERDIDA DE LAS PROPIEDADES DE LOS PAQUETES ADITIVOS DEL ACEITE	10	1	5	1	5	5	4,2	42
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	ACEITE HIDRÁULICO	IEXT1	CONTAMINACIÓN	Mezcla de fluido entre sistemas hidráulicos	3	1	5	1	5	5	4,2	12,6
		BOMBA DE DIRECCIÓN		C-M9	CAVITACIÓN	M4 Bajo nivel de aceite hidráulico en el tanque. Insuficiente suministro de flujo.	7	1	1	1	5	5	3,8	26,6
		BOMBA DE DIRECCIÓN		BRD	PARADA POR ROTURA	STD- Deficiencia estructural - fisuras internas en la bomba	7	1	1	1	5	5	3,8	26,6
		BOMBA DE DIRECCIÓN		C-M2	DESALINEADO	VIB C-M10 - VIBRACIÓN	3	1	1	1	3	3	2,4	7,2
		BOMBA DE DIRECCIÓN		M1	PERDIDA DE PRESION EN EL SISTEMA	(ELP) FUGA FLUIDO DE PROCESO	5	1	1	3	5	5	4	20
		BOMBA DE DIRECCIÓN		M6	SOBREPRESIÓN	(PLU) TAPONADO / OBSTRUIDO / ATASCADO DE MANGUERAS, MULTIPLES	5	1	3	1	3	3	2,6	13
		BOMBA DE DIRECCIÓN	BLOQUE VÁLVULA COMPENSADORA	FTR	NO REGULA LOS CICLOS DE OPERACIÓN DE LA BOMBA	C-INST3 BLOQUE VÁLVULAS DESAJUSTADAS	10	1	3	1	1	1	1,2	12

Fuente: Autores

Cuadro 10. Criticidad Modos de falla (3)

UBICACION	SISTEMA	EQUIPO	COMPONENTE	CODIGO MODO DE FALLA	MODO DE FALLA (SÍNTOMAS)	DESCRIPCIÓN - CAUSA	FRECUENCIA	IMPACTO/CONSECUENCIA					IMPACTO	CRITICIDAD DE LA FALLA
								Seguridad del Personal	Seguridad del Equipo	Medio Ambiente	Económicos	Mantenimiento		
								10%	10%	10%	40%	30%		
CAMION ELÉCTRICO EH500	DIRECCIÓN											0	0	
		BOMBA DE DIRECCIÓN	BLOQUE VÁLVULA COMPENSADORA	FTR	NO REGULA LOS CICLOS DE OPERACIÓN DE LA BOMBA	LBP - BAJA PRESIÓN DE ACEITE QUE PILOTEA EL BLOQUE COMPENSADOR	7	1	3	1	1	1	1,2	8,4
		BOMBA DE DIRECCIÓN	BLOQUE VÁLVULA COMPENSADORA	FTR	NO REGULA LOS CICLOS DE OPERACIÓN DE LA BOMBA	INL- FUGA INTERNA DE ACEITE EN EL BLOQUE COMPENSADOR	7	1	3	1	3	3	2,6	18,2
		BOMBA DE DIRECCIÓN	BLOQUE VÁLVULA COMPENSADORA	ELP	FUGA FLUIDO DE PROCESO	C-M5 - Fugas por O-ringsUNIONES DE ACOPLES CON FUGAS SELLOS EMPAQUETADURAS CRISTALIZADOS DETERIORADOS	10	1	3	1	1	3	1,8	18
		BOMBA DE DIRECCIÓN	BLOQUE VÁLVULA COMPENSADORA	ELP	FUGA FLUIDO DE PROCESO	C-MAT3 - FRACTURA: Falla por grietas, brechas, rajaduras, rompimiento,	7	1	3	1	3	3	2,6	18,2
		ACUMULADORES DE DIRECCION		M1	PERDIDA DE PRESION EN EL SISTEMA	INL - (C-M5) -FUGAS POR EMPAQUETADURA- SELLOS INTERNOS ROTOS EN EL ACUMULADOR - NO HAY DIFERENCIA DE PRESIÓN- LA PRECARGA SE PIERDE	7	1	3	1	5	3	3,4	23,8
		COLUMNA DE DIRECCION	VALVULA CONTROL DE LA DIRECCIÓN "ORBITROL"	C-M7	OBSTRUCCIÓN DE CONDUCTOS	IEXT1 - Contaminación del aceite hidráulico	7	1	3	1	5	3	3,4	23,8
		COLUMNA DE DIRECCION	VALVULA CONTROL DE LA DIRECCIÓN "ORBITROL"	INL	FUGA INTERNA	C-M5 -Empaquetadura -Orings rotos	10	1	3	3	3	3	2,8	28
		COLUMNA DE DIRECCION	VALVULA CONTROL DE LA DIRECCIÓN "ORBITROL"	INL	FUGA INTERNA	C-MAT3 -Fractura, agrietamiento interno de la válvula orbitrol	7	1	3	1	5	5	4	28
		CILINDROS		STD	DEFICIENCIA ESTRUCTURAL	Superficie Exterior/Interior Fisurada, Rota - Dañada	3	1	1	3	3	5	3,2	9,6
		CILINDROS		INL	FUGA INTERNA	C-M5 -Empaquetadura -Orings rotos dentro del cilindro	5	1	1	1	3	5	3	15
		CILINDROS		INL	FUGA INTERNA	C-MAT4 - Desgaste de las paredes internas del cilindro por la acción repetitiva de entrada y salida del vástago	5	1	1	1	3	5	3	15

Fuente: Autores

4.5 PLAN DE MANTENIMIENTO

Con el análisis de los modos de falla y la criticidad de los modos de falla de los equipos críticos del sistema de dirección, se determinó a través del diagrama de decisión de la metodología RCM2²⁰ (Figura 35), las tareas a implementar en el plan de mantenimiento del sistema. Algunas otras actividades fueron añadidas de manuales y de la experiencia de los técnicos en la ejecución de las tareas. Finalmente se establecieron las frecuencias y los recursos para la ejecución de éstas. El resultado de este análisis es desarrollo de un plan de mantenimiento para el sistema de dirección de los camiones eléctricos EH5000. (Cuadro 11, 12 y 13, 14 Y 15)

Junto con el plan de mantenimiento, se codificaron los tipos de acciones de las tareas de mantenimiento con base en la norma ISO 14224. (Ver tabla 15 y 16)

Tabla 15. Tipo de acciones del plan de mantenimiento

TIPO DE ACCIÓN		
Tipo de Acción: Es ingresada por el planeador. Es utilizado para identificar que tipo de acción que se realizará en el mantenimiento		
CODIGO	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIONES
C02 C	REPARAR / RECONSTRUIR	Acción de mantenimiento manual realizada para restaurar un equipo o parte a su apariencia y estado originales. Es utilizado en Mantenimiento Correctivo. Ejemplo: Volver a empacar, soldar, taponear, reconectar, rehacer, etc
C03 C-P	CAMBIAR/REPONER/REEMPLAZAR	Reemplazo del equipo o item por uno nuevo, o repotenciado, del mismo tipo. Es utilizado para Mantenimiento Correctivo y Preventivo. Ejemplo: Reemplazo de un cojinete desgastado
C04 C-P	AJUSTAR / CALIBRAR	Hacer que alguna condición que está fuera de tolerancia se encuentre dentro del rango de tolerancia. Es utilizado en Mantenimiento Preventivo y Correctivo. Ejemplo: Alinear, programar y reprogramar, calibrar, balancear
C05 C-P	MODIFICAR (MEJORAR/MODERNIZAR)	Reemplazar, renovar o cambiar el equipo, o parte de él, con un equipo/parte de diferente tipo, marca, material o diseño. Es utilizado en Mantenimiento Preventivo y Correctivo. Ejemplo: Instalar un filtro con un diámetro de malla más pequeño, reemplazar una bomba para aceite de lubricación con otro tipo de bomba, etc.
C06 C	VERIFICAR	La causa de una avería es investigada, pero no se realiza ninguna acción de mantenimiento, o se posterga la acción. Es posible que pueda funcionar nuevamente con acciones simples como, por ejemplo, reiniciar o reprogramar. Es usado en Mantenimiento Correctivo. Ejemplo: Reiniciar, reprogramar, etc. particularmente para averías funcionales como por ejemplo en los detectores de incendios y gas

Fuente: Autores

²⁰MOBRAY, John. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Asheville: Aladon LLC. 2004. p 204, 205.

Tabla 16. Tipo de acciones del plan de mantenimiento

TIPO DE ACCIÓN		
Tipo de Acción: Es ingresada por el planeador. Es utilizado para identificar que tipo de acción que se realizará en el mantenimiento		
CODIGO	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIONES
C07 P	SERVICIOS MENORES	Tareas periódicas de servicio. Normalmente no es necesario desmantelar el equipo. Actividades de reparaciones/servicios menores para mejorar la apariencia interna y externa de un equipo. Es utilizado para Mantenimiento Preventivo. Ejemplo: Limpieza, reabastecimiento de insumos, ajustes y calibraciones, pulir, revestir, pintar.
C09 P	INSPECCIONAR	Inspecciones/verificaciones periódicas. Cuidadoso escrutinio de un aparato con o sin desmantelamiento, normalmente con el uso de los sentidos. Es utilizado en Mantenimiento Preventivo. Ejemplo: Todos los tipos de verificaciones generales. El mantenimiento general se incluye como parte de tareas de inspección
C10 C-P	OVERHAUL	Acondicionamiento integral. Inspeccion, reacondicionamiento integral con desensamblaje y reemplazo de partes, según se especifique o requiera. Es utilizado en Mantenimiento Preventivo y Correctivo
C13 P	LUBRICAR	Es utilizado en Mantenimiento Preventivo y Correctivo.
C14 P	PROBAR / MEDIR	Pruebas periódicas de la disponibilidad de funciones. Es utilizado en Mantenimiento Preventivo. Ejemplo: Prueba de funciones de la bomba contra incendios, detectores de gas, equipos de respaldo etc.
C15 P	ASEAR / LIMPIAR	Es utilizado en Mantenimiento Preventivo y Correctivo.
C16 C	MONTAR / CONSTRUIR	Instalacion de equipo que no existe en el sistema, diferente a reemplazar, modificar o cambiar
C17 C	DESMONTAR / DEMOLER	
C18 C-P	TRANSPORTAR	
C19 P	REUBICAR	
C20 P	MP AUTOMATICO	Utilizado para Ordenes de Trabajo Modelo, para la generacion del MP
C21 P	MUESTREAR	Toma de muestras de aceites para su posterior análisis y determinar el estado del aceite, acciones a seguir.
C22 P-C	FILTRAR	Filtrado del aceite para asegurar condiciones de operación

Fuente: Autores

Cuadro 11. Optimización del Plan de Mantenimiento del sistema de dirección camión EH5000 (1)

UBICACIÓN	SISTEMA	EQUIPO	COMPONENTE	TIPO DE ACCIÓN O ACTIVIDAD A REALIZAR Norma ISO 14224	DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD		FRECUENCIA DE EJECUCIÓN				
							12 HR	750 HR	1500 HR	3000 HR	Según condición
CAMIÓN ELÉCTRICO EH5000	DIRECCIÓN				Actividades propuestas	Actividades existentes					
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN		INSPECCIONAR	1. Visualmente verificar que el tanque no presente grietas. 2. Realizar inspecciones estructurales con UT/ Tintas Penetrante para identificar grietas			1	2	2	
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN		INSPECCIONAR	1. Visualmente, Revisar condición física de los acoples de los puertos de entrada y salida del tanque hidráulico			1	1	1	
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	FILTRO RESPIRADERO	CAMBIAR/REPONER/REEMPLAZAR	1. Cambiar 2 filtros respiraderos tanque hidráulico			1	1		
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	MALLAS (Filtrante)	ASEAR / LIMPIAR	1. Lavar el tanque hidráulico y limpiar los filtros coladores						4000 hr
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	MANGUERAS DE RETORNO	INSPECCIONAR	1. Revisar condición física (cristalización, fuga) de las mangueras de retorno al tanque hidráulico. 2. Revisar ajuste de abrazaderas que sujetan la manguera al puerto de salida del tanque			1, 2	1, 2	1, 2	
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	MANGUERAS DE RETORNO	INSPECCIONAR	1. Revisar condición física (rotura) de las mangueras de retorno al tanque hidráulico.			1	1	1	
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	MANGUERAS DE RETORNO	REUBICAR	1. Enrutar las mangueras que se encuentran rozando entre sí o con algún componente, o estructura del camión			1	1	1	

Fuente: Autores

Cuadro 12. Optimización del Plan de Mantenimiento del sistema de dirección camión EH5000 (2)

UBICACIÓN	SISTEMA	EQUIPO	COMPONENTE	TIPO DE ACCIÓN O ACTIVIDAD A REALIZAR Norma ISO 14224	DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD	FRECUENCIA DE EJECUCIÓN					
						12 HR	750 HR	1500 HR	3000 HR	Según condición	
CAMIÓN ELÉCTRICO EH5000	DIRECCIÓN				Actividades propuestas	Actividades existentes					
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	MANGUERAS DE SUCCIÓN	INSPECCIONAR	1. Revisar condición física (cristalización, fuga) de las mangueras de succión desde el tanque hidráulico a la bomba de dirección. 2. Revisar ajuste de abrazaderas que sujetan la manguera entre el tanque y la bomba de dirección		1, 2	1, 2	1, 2		
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	MANGUERAS DE SUCCIÓN	INSPECCIONAR	1. Revisar condición física (rotura) de la manguera de succión del tanque a la bomba de dirección		1	1	1		
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	MANGUERAS DE SUCCIÓN	REUBICAR	1. Enrutar la manguera que se encuentran rozando entre sí o con algún componente, o estructura del camión		1	1	1		
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	ACEITE HIDRÁULICO	MUESTREAR	1. Realizar análisis de aceite (Prueba físico química). En caso de encontrar evidencia de degradación en el aceite, programar cambio		1				
		TANQUE DE ACEITE HIDRÁULICO DE DIRECCIÓN	ACEITE HIDRÁULICO	FILTRAR	1. Hacer flushing al aceite hidráulico del tanque de dirección según resultados del análisis de aceite					1	
		BOMBA DE DIRECCIÓN		VERIFICAR	1. Medir nivel aceite hidráulico (Levante y Dirección) y completar si es necesario	1	1	1	1		
		BOMBA DE DIRECCIÓN		INSPECCIONAR	1. Realizar termografía para hacer seguimiento al desgaste interno de la bomba				1		

Fuente: Autores

Cuadro 13. Optimización del Plan de Mantenimiento del sistema de dirección camión EH5000 (3)

UBICACIÓN	SISTEMA	EQUIPO	COMPONENTE	TIPO DE ACCIÓN O ACTIVIDAD A REALIZAR Norma ISO 14224	DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD	FRECUENCIA DE EJECUCIÓN					
						12 HR	750 HR	1500 HR	3000 HR	Según condición	
CAMIÓN ELÉCTRICO EH5000	DIRECCIÓN				Actividades propuestas	Actividades existentes					
		BOMBA DE DIRECCIÓN		VERIFICAR	1. Realizar análisis de vibraciones para identificar la fuente de la vibración				1		
		BOMBA DE DIRECCIÓN		INSPECCIONAR	1. Revisar conexiones de la bomba por fugas		1	1	1		
		BOMBA DE DIRECCIÓN		ASEAR / LIMPIAR	1. Lavar el tanque hidráulico y limpiar los filtros coladores 2. Drenar/Cambiar las mangueras de succión y salida de la Bomba para eliminar residuos					4000 hr	
		BOMBA DE DIRECCIÓN	BLOQUE VÁLVULA COMPENSADORA	PROBAR / MEDIR AJUSTAR / CALIBRAR	1. Medir presión de trabajo del sistema de dirección con manómetro, anotar en Tabla 1. Calibrar si fuera necesario y registrar presión final. 2. Medir presión stand by bomba dirección con manómetro, anotar en Tabla 1. Calibrar si fuera necesario y registrar presión final		1, 2		2		
		BOMBA DE DIRECCIÓN	BLOQUE VÁLVULA COMPENSADORA	INSPECCIONAR	1. Revisar condición física de la manguera desde la RCB al bloque válvula compensadora. 2. Revisar que esté bien enrutada, no toque puntas.		1, 2	1, 2	1, 2		
		BOMBA DE DIRECCIÓN	BLOQUE VÁLVULA COMPENSADORA	PROBAR / MEDIR	1. Medir presión de trabajo del sistema de dirección con manómetro, anotar en Tabla 1. Calibrar si fuera necesario y registrar presión final. 2. Medir presión stand by bomba dirección con manómetro, anotar en Tabla 1. Calibrar si fuera necesario y registrar presión final		1	1	1		

Fuente: Autores

Cuadro 14. Optimización del Plan de Mantenimiento del sistema de dirección camión EH5000 (4)

UBICACIÓN	SISTEMA	EQUIPO	COMPONENTE	TIPO DE ACCIÓN O ACTIVIDAD A REALIZAR Norma ISO 14224	DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD	FRECUENCIA DE EJECUCIÓN					
						12 HR	750 HR	1500 HR	3000 HR	Según condición	
CAMIÓN ELÉCTRICO EH5000	DIRECCIÓN				Actividades propuestas	Actividades existentes					
		BOMBA DE DIRECCIÓN	BLOQUE VÁLVULA COMPENSADORA	CAMBIAR/REPONER/REEMPLAZAR	1. Cambiar Orings del Bloque válvula compensadora en caso de encontrarse fuga en el bloque.						1
		BOMBA DE DIRECCIÓN	BLOQUE VÁLVULA COMPENSADORA	INSPECCIONAR CAMBIAR	1. Si la fuga persiste después del cambio de Orings- cambie el bloque válvula compensadora		1	1	1		2
		FILTRO HIDRÁULICO DE ALTA PRESIÓN		CAMBIAR/REPONER/REEMPLAZAR	1. Cambiar 3 filtros de presión del sistema hidráulico 2. Inspeccionar tornillos que fijan cabezal de filtros hidráulicos de alta a la base		1	1	1		
		VÁLVULA R.C.B		INSPECCIONAR	1. Revisar válvula R.C.B líneas y conexiones por fugas			1	1		
		ACUMULADORES DE DIRECCION		PROBAR / MEDIR AJUSTAR / CALIBRAR VERIFICAR	1. Revisar condición física de los 2 acumuladores de dirección.		1	1	1		
		ACUMULADORES DE DIRECCION	TRANSDUCTOR DE PRESIÓN DEL ACUMULADOR	PROBAR / MEDIR	1. Medir presión acumulador nº1 nº 2 de dirección con Contronics		1				
		VÁLVULA AMPLIFICADORA DE FLUJO		INSPECCIONAR	1. Revisar condición física/fugas de la v/v amplificadora, líneas y conexiones		1	1	1		
		VÁLVULA AMPLIFICADORA DE FLUJO		VERIFICAR	1. Realizar termografía para hacer seguimiento al desgaste interno de valvulas en el sistema hidráulico del camión				1		

Fuente: Autores

Cuadro 15. Optimización del Plan de Mantenimiento del sistema de dirección camión EH5000 (5)

UBICACIÓN	SISTEMA	EQUIPO	COMPONENTE	TIPO DE ACCIÓN O ACTIVIDAD A REALIZAR Norma ISO 14224	DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD	FRECUENCIA DE EJECUCIÓN				
						12 HR	750 HR	1500 HR	3000 HR	Según condición
CAMIÓN ELÉCTRICO EH5000	DIRECCIÓN				Actividades propuestas Actividades existentes					
		COLUMNA DE DIRECCION		LUBRICAR	1. Engrasar y verificar el ajuste de la columna de la dirección			1	1	
		COLUMNA DE DIRECCION	VALVULA CONTROL DE LA DIRECCIÓN "ORBITROL"	ASEAR / LIMPIAR	1. Destapar la válvula orbitrol y limpiar los conductos internos					4000 HR
		COLUMNA DE DIRECCION	VALVULA CONTROL DE LA DIRECCIÓN "ORBITROL"	INSPECCIONAR	1. Revisar condición física/fugas de la v/v orbitrol, líneas y conexiones. 2. Asegurar que los tornillos si estén fijando válvula Orbitrol.		1, 2	1, 2	1, 2	
		COLUMNA DE DIRECCION	VALVULA CONTROL DE LA DIRECCIÓN "ORBITROL"	VERIFICAR	1.Realizar termografía para hacer seguimiento al desgaste interno de valvulas en el sistema hidráulico del camión				1	
		CILINDROS		INSPECCIONAR	1. Revisar estado/fugas de los cilindros de dirección, líneas y conexiones. 2. Revisar estado de las rotulas de los 2 cilindros y barra de dirección. 3. Asegurar torque a 75 ft.lb tornillos pines cilindros dirección y barra dirección		1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	
		CILINDROS		INSPECCIONAR	1. Revisar estado/fugas de los cilindros de dirección, líneas y conexiones		1	1	1	
		CILINDROS		VERIFICAR	1. Inspeccionar con termografía el cuerpo de los cilindros de dirección				1	

Fuente: Autores

4.6 APLICACIÓN TÉCNICA DE FIABILIDAD HUMANA SHERPA

Como se mencionó en la sección 2.4.2 del marco teórico, la técnica SHERPA consta de ocho pasos, los cuáles se van a desarrollar en esta sección aplicados a una tarea crítica del plan de mantenimiento del sistema de dirección descrito en los cuadros 11 al 15.

Tomando como guía el documento final del análisis SHERPA que se presenta en los Cuadros 16 17, 18 y 19 se puede ver el paso uno en la columna *PASO TAREA*. Los pasos dos y tres se registran en la columna *MODO ERROR*. El cuarto en las columnas *DESCRIPCIÓN* y *CONSECUENCIA*. El quinto en la columna *REMEDIAR*. El sexto y séptimo en la columna *P* y *C*, respectivamente; y el octavo y último punto en la columna *SUGERENCIAS*

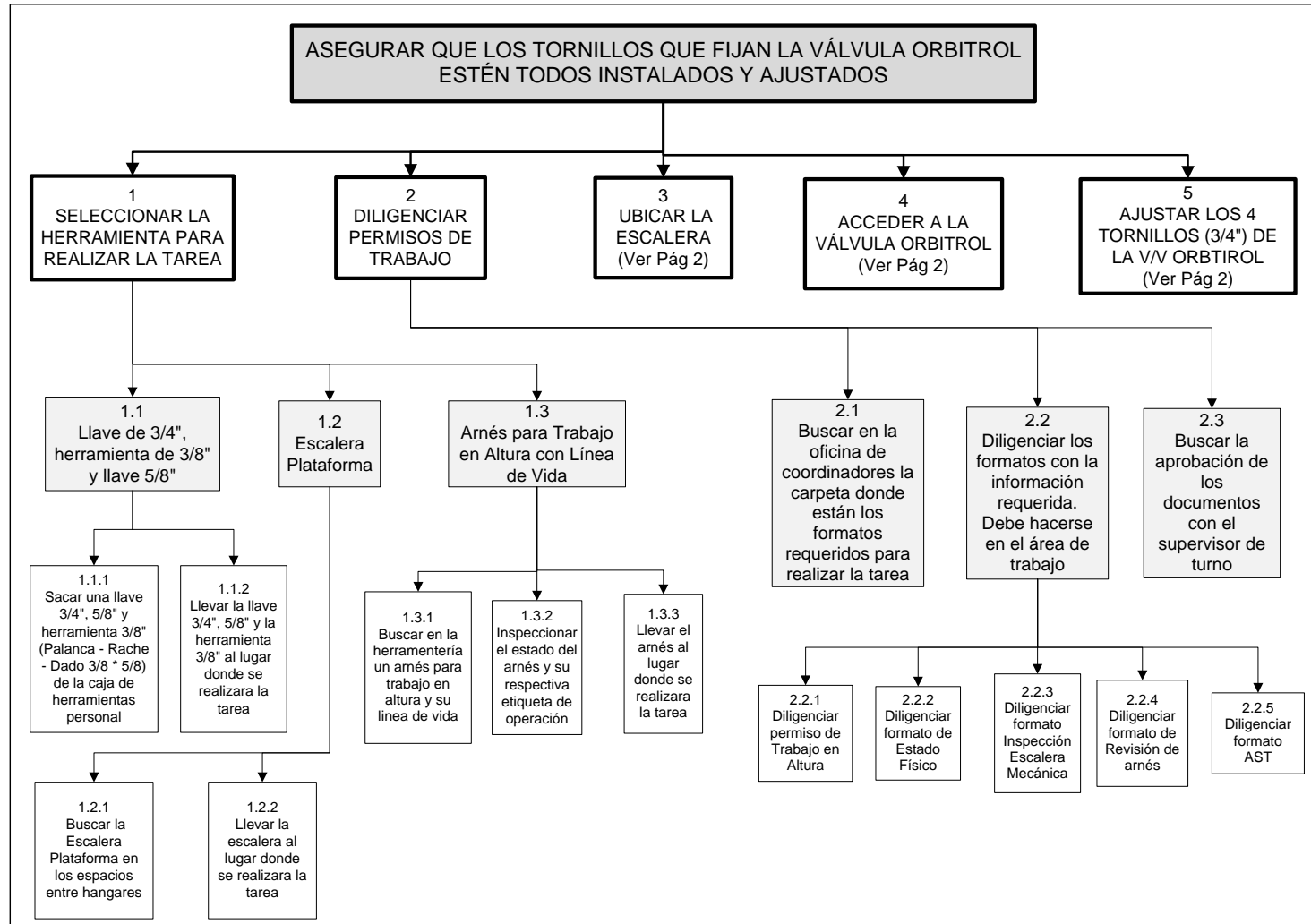
4.6.1 Paso 1. Análisis Jerárquico de Tareas

El primer paso de un análisis SHERPA es hacer un HTA (Hierarchical Task Analysis), es decir, un análisis jerárquico de la tarea objeto de estudio (Figuras 36 y 37). La tarea seleccionada está en el Cuadro 15 (Optimización del plan de mantenimiento del Sistema de dirección camión EH5000), asociada al equipo COLUMNA DE DIRECCIÓN y al componente VÁLVULA CONTROL DE LA DIRECCIÓN "ORBITROL": *Asegurar que los tornillos si estén fijando la válvula Orbitrol.*

4.6.2 Paso 2. Clasificación de las tareas

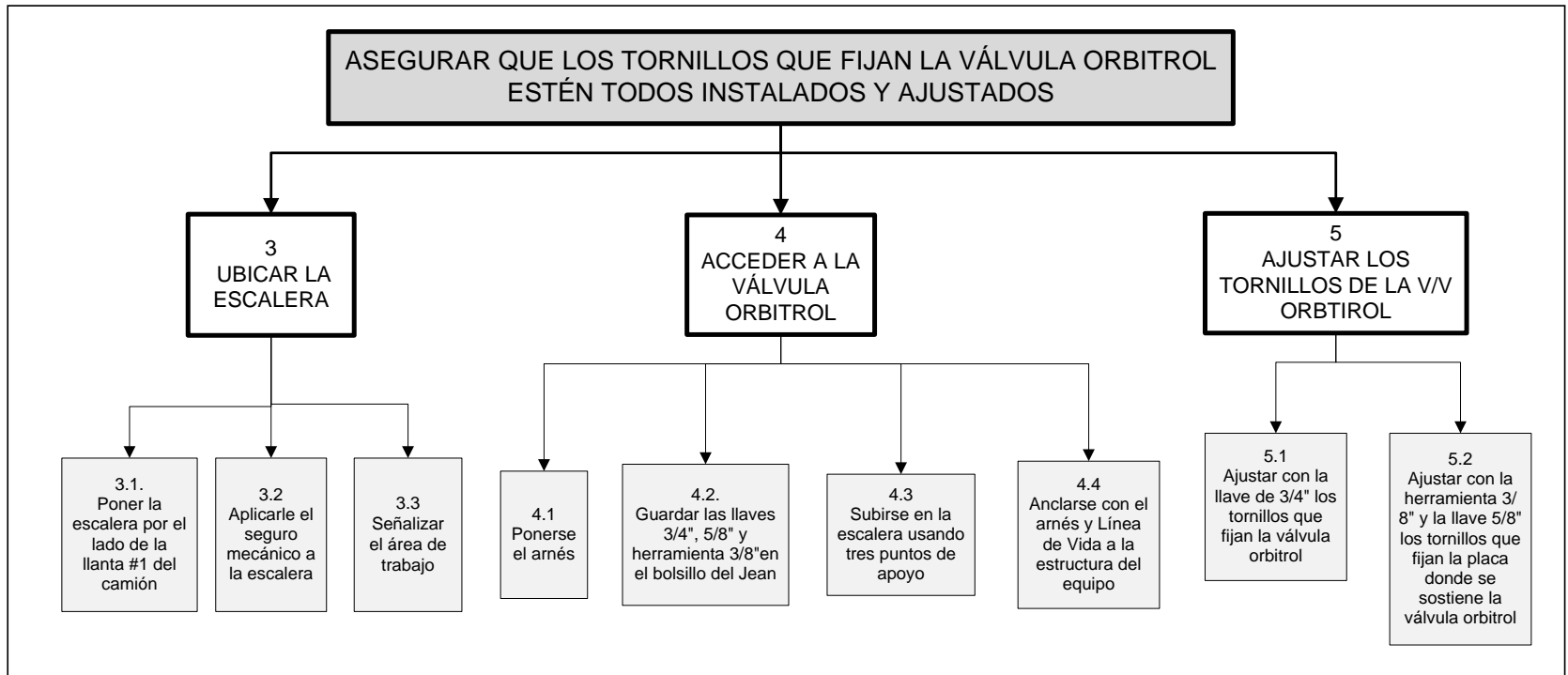
Cada una de las tareas del nivel inferior según el HTA se tiene en consideración y se clasifica desde la taxonomía de errores en uno de los siguientes tipos: Acción (*Action*), Verificación (*Checking*), Recuperación (*Retrieval*), Comunicación (*Communication*), Selección (*Selection*). (Ver tabla 17).

Figura 36. HTA: Asegurar que los tornillos que fijan la válvula orbitrol estén instalados y ajustados



Fuente: Autores

Figura 37. CONTINUACIÓN HTA: Asegurar que los tornillos que fijan la válvula orbitrol estén instalados y ajustados



Fuente: Autores

4.6.3 Paso 3. Identificación del Error Humano

Una vez identificado el tipo de error en cada tarea, se considera los modos de error creíbles asociados a dicha actividad, es decir, se presenta una descripción de la forma en que se daría el error según la tabla 17.

Tabla 17. Taxonomía y modos de error SHERPA

SHERPA ERROR MODES		
ERROR TYPE	CODE	ERROR MODE
ACTION ERRORS	A1	Operation too long/short
	A2	Operation mistimed
	A3	Operation in wrong direction
	A4	Operation too little/much
	A5	Misalign
	A6	Right operation on wrong object
	A7	Wrong operation on right object
	A8	Operation omitted
	A9	Operation incomplete
	A10	Wrong operation on wrong object
CHECKING ERRORS	C1	Check omitted
	C2	Check incomplete
	C3	Right check on wrong object
	C4	Wrong check on right object
	C5	Check mistimed
	C6	Wrong check on wrong object
RETRIEVAL ERRORS	R1	Information not obtained
	R2	Wrong information obtained
	R3	Information retrieval incomplete
COMMUNICATION ERRORS	I1	Information not communicated
	I2	Wrong information communicated
	I3	Information communication incomplete
SELECTION ERRORS	S1	Selection omitted
	S2	Wrong selection made

Fuente: LANE, Rhonda; STANTON, Neville; HARRISON, David. Hierarchical Task Analysis to Medication Administration Errors. Brunel University.

4.6.4 Paso 4. Análisis de las consecuencias

Luego de identificar el tipo de error más creíble que puede ocurrir en el desarrollo de la tarea, se describe cómo se observaría el error y las consecuencias de incurrir en él.

4.6.5 Paso 5. Análisis de recuperación

Conociendo las consecuencias de cometer el error, se analiza en la jerarquía de tareas, dónde puede recuperarse, es decir, en qué punto se puede corregir. Si se identifica una tarea que cumpla las condiciones se introduce el número asignado según el HTA. De no tener tarea de recuperación, se deja en blanco la casilla.

4.6.6 Paso 6. Análisis de probabilidad ordinal.

Una vez que la consecuencia y el potencial de recuperación se han identificado, se estima la probabilidad de ocurrencia del error. Para lo cual se introduce un valor ordinal de probabilidad que puede ser bajo, medio o alto.

Para la tarea bajo análisis se asignaron según los siguientes eventos: LOW (L): Raro que ocurra. MEDIUM (M): Ha ocurrido una o dos veces en la ejecución de la tarea. HIGH (H) Ocurre frecuentemente, más de dos veces en la ejecución de la tarea.

4.6.7 Paso 7. Análisis de criticidad

Con este paso se identifican aquellos errores con consecuencias que se consideran críticas. La identificación de la criticidad se realiza en forma binaria. Típicamente una consecuencia crítica sería una que puede ocasionar un daño sustancial al equipo, planta o producto y/o lesiones al personal. Para la tarea en análisis se plantearon los siguientes criterios: LOW (L): No hay daños a personas/equipo. MEDIUM (M): Lesiones personales, o daños de equipos. HIGH (H): Fatalidad.

4.6.8 Paso 8. Análisis remedial

La parte final en este proceso es proponer recomendaciones para reducir los índices de fallos por errores humanos en la ejecución de las tareas. En mantenimiento, lo obvio no siempre lo es, cada persona piensa y actúa diferente, por lo tanto se deben estandarizar aquellas tareas en las que los errores no son tolerables debido a su criticidad. De esta manera se ganaría confiabilidad humana en la ejecución de las tareas.

Las sugerencias que se obtiene de un análisis SHERPA tienen que ver con rediseño de instructivos, procedimientos, capacitación del personal, rediseño de equipos/sistemas, rediseños en la logística y distribución de la planta, entre otras.

Cuadro 16. Análisis SHERPA (1)

ANÁLISIS DEL ERROR HUMANO - SHERPA							
TAREA: ASEGURAR QUE LOS TORNILLOS QUE FIJAN LA VÁLVULA ORBITROL ESTÉN TODOS INSTALADOS Y AJUSTADOS							
PASO TAREA	MODO ERROR	DESCRIPCIÓN	CONSECUENCIA	REMIEDIAR	P	C	SUGERENCIAS
1.1.1	S2	Sacar llaves diferentes a las especificadas de la caja de herramientas personal	Pérdida de tiempo	4.2	L	L	Crear un APL en Ellipse (CMMS) para la realización de la tarea
1.1.2	A9	No llevar las llaves 3/4", 5/8" y herramienta 3/8" al lugar de la tarea	Pérdida de tiempo	4.2	L	L	Dar la orden para que el APL llegue al lugar donde se realizará a tarea
1.2.1	A1	Caminar 11 hangares buscando la escalera adecuada	Pérdida de tiempo		M	L	Determinar un área para la ubicación de escaleras mecánicas
	S2	Selección de escalera no adecuada para realizar la tarea	Pérdida de tiempo	3.1	M	M	Rotular las escaleras para las posibles tareas para las cuales pueden ser usadas. Auyudas visuales.
1.2.2	A9	No llevar la escalera al lugar de la tarea	Pérdida de tiempo	3.1	L	M	
1.3.1	S2	El herramentero selecciona el arnés incorrecto para la tarea y lo entrega al técnico quien lo busca	Potencial accidente/lesión de la persona quien usa el arnés	2.2	L	H	Etiquetar los arneses destinados para tareas en camiones EH5000
1.3.2	C1	No revisó el arnés cuando lo entregaron de herramienta	Potencial accidente/lesión de la persona quien usa el arnés	2.2.4	L	H	
1.3.3	A9	No llevar el arnés al lugar de la tarea	Pérdida de tiempo	2.2.4	L	L	
2.1	A8	No se tienen los permisos de trabajo requeridos para realizar la tarea	No hay ejecución de la tarea	2.3	L	L	Poner los permisos de trabajo en la cartelera de la flota, ubicada en el taller, para que sean de fácil acceso. De esta manera se evitara perdidas de tiempo al trasladarse a la oficina de coordinadores.
2.2.1	A6	Diligenciar el formato incorrecto	No se autoriza la realización de la tarea	2.3	M	L	Rotular los permisos de trabajo en la cartelera de la flota
	A9	No se diligenció completamente el formato	No se autoriza la realización de la tarea	2.3	M	L	En la cartelera de la flota poner un ejemplo de un formato diligenciado correctamente
	A8	No se diligenció el formato	No se autoriza la realización de la tarea	2.3	M	L	Hacer una tabla en la que se relacionen la tareas con los permisos asociados a ella.

Fuente: Autores

Cuadro 17. Análisis SHERPA (2)

ANÁLISIS DEL ERROR HUMANO - SHERPA							
TAREA: ASEGURAR QUE LOS TORNILLOS QUE FIJAN LA VÁLVULA ORBITROL ESTÉN TODOS INSTALADOS Y AJUSTADOS							
PASO TAREA	MODO ERROR	DESCRIPCIÓN	CONSECUENCIA	REMIEDIAR	P	C	SUGERENCIAS
2.2.2	A6	Diligenciar el formato incorrecto	No se autoriza la realización de la tarea	2.3	M	L	Rotular los permisos de trabajo en la cartelera de la flota
	A8	No se diligenció el formato	No se autoriza la realización de la tarea	2.3	M	L	Hacer una tabla en la que se relacionen las tareas con los permisos asociados a ella.
2.2.3	A6	Diligenciar el formato incorrecto	No se autoriza la realización de la tarea	2.3	M	L	Rotular los permisos de trabajo en la cartelera de la flota
	A9	No se diligenció completamente el formato	No se autoriza la realización de la tarea	2.3	M	L	En la cartelera de la flota poner un ejemplo de un formato diligenciado correctamente. Con una imagen de las escaleras posibles a usar, se señalan los aspectos que hay que inspeccionar y donde se puede encontrar la información requerida por el formato.
	A8	No se diligenció el formato	No se autoriza la realización de la tarea	2.3	M	L	Hacer una tabla en la que se relacionen las tareas con los permisos asociados a ella.
2.2.4	A6	Diligenciar el formato incorrecto	No se autoriza la realización de la tarea	2.3	M	L	Rotular los permisos de trabajo en la cartelera de la flota
	A9	No se diligenció completamente el formato	No se autoriza la realización de la tarea	2.3	M	L	En la cartelera de la flota poner un ejemplo de un formato diligenciado correctamente. Con una imagen del arnés, se señalan los aspectos que hay que inspeccionar y donde se puede encontrar la información requerida por el formato.
	A8	No se diligenció el formato	No se autoriza la realización de la tarea	2.3	M	L	Hacer una tabla en la que se relacionen las tareas con los permisos asociados a ella.
2.2.5	A8	No se diligenció el formato	No se autoriza la realización de la tarea	2.3	M	M	

Fuente: Autores

Cuadro 18. Análisis SHERPA (3)

ANÁLISIS DEL ERROR HUMANO - SHERPA							
TAREA: ASEGURAR QUE LOS TORNILLOS QUE FIJAN LA VÁLVULA ORBITROL ESTÉN TODOS INSTALADOS Y AJUSTADOS							
PASO TAREA	MODO ERROR	DESCRIPCIÓN	CONSECUENCIA	REMEDIAR	P	C	SUGERENCIAS
2.3	R3	Hace falta información en los formatos	Se deben diligenciar nuevamente los formatos erróneos o incompletos, de lo contrario no se autoriza la realización de la tarea		M	L	
	C3	Se autoriza la realización de la tarea a pesar de anomalías encontradas en los formatos y herramienta a utilizar	Potencial accidente de las personas involucradas en la tarea		L	C	
3.1	A7	Se posiciona la escalera por la llanta #1 pero no se hace según las condiciones para usarse.	La escalera puede caerse por no estar soportada y provocar un accidente a la persona que realiza la tarea	3.2	L	C	En el formato de procedimiento de la tarea mostrar las posibles escaleras que se usan y la forma como deben ser puestas en la llanta #1 del camión
3.2	A8	No se le aplicó el seguro a la escalera	La escalera puede moverse durante la ejecución de la tarea, pudiendo causar un accidente a la persona que la realiza	4.3	M	C	
3.3	A8	No se señala el área donde se realiza la tarea para evitar que otras personas ajenas pasen por el lugar	Cualquier persona puede acercarse al lugar donde se realiza la tarea y provocar un accidente o resultar herida por un accidente ocurrido		M	C	
4.1	A7	Ponerse el arnés incorrectamente	En caso de caída el arnés no protegerá a la persona que lo usa de sufrir golpes mayores.		L	C	
4.2	A8	Olvidar guardar la herramienta en el pantalón para subirla para hacer la tarea	Pérdida de tiempo	5.1	M	L	Dotar de cinturones o bolso portaherramienta a la persona que realiza trabajo en altura

Fuente: Autores

Cuadro 19. Análisis SHERPA (4)

ANÁLISIS DEL ERROR HUMANO - SHERPA							
TAREA: ASEGURAR QUE LOS TORNILLOS QUE FIJAN LA VÁLVULA ORBITROL ESTÉN TODOS INSTALADOS Y AJUSTADOS							
PASO TAREA	MODO ERROR	DESCRIPCIÓN	CONSECUENCIA	REMIEDIAR	P	C	SUGERENCIAS
4.3	A8	No apoyarse en tres puntos al momento de subir la escalera	Pérdida del equilibrio y posibilidad de caerse a un nivel inferior con posible lesiones de la persona accidentada		M	M	Dotar de cinturones o bolso portaherramienta a la persona que realiza trabajo en altura para que pueda tener las manos libres y poder tomar la escalera en tres puntos.
4.4	A6	Anclarse en un punto de la estructura del equipo que no este certificado como punto de anclaje	Accidente, caída de la persona que realiza la tarea. Posible fatalidad.		M	C	Crear puntos de anclaje certificados cerca de los lugares del equipo que por su ubicación generan un trabajo en altura.
	A7	Anclarse a un punto certificado pero no fijarse que quede bien asegurado	Accidente, caída de la persona que realiza la tarea. Posible fatalidad.		L	C	En el formato de procedimiento de la tarea explicar cómo se debe anclar a un punto certificado de la estructura del equipo.
5.1	A6	Ajustar otros tornillos cerca de donde está la válvula orbitrol	Tarea no ejecutada		L	C	En el formato de procedimiento de la tarea señalar con la ayuda de una imagen cuáles son los tornillos a los que se hace referencia la tarea.
5.2	A6	Ajustar otros tornillos cerca de la placa donde se sostiene la válvula orbitrol	Tarea no ejecutada		L	C	En el formato de procedimiento de la tarea señalar con la ayuda de una imagen cuáles son los tornillos a los que se hace referencia la tarea.

Fuente: Autores

5 IMPLEMENTACIÓN

La metodología presentada no ha sido implementada en la empresa, sin embargo, se pueden plantear los beneficios que obtendría la flota si llegara a desarrollar lo descrito en la monografía.

- Sería una herramienta que complementaría la gestión del riesgo para la reducción de accidentes durante la ejecución de las tareas críticas (que pueden ocasionar pérdidas humanas y económicas) de mantenimiento identificadas en la flota.
- Se generaría un indicador que midiera el desempeño de las personas que ejecutan el mantenimiento, de manera que pueda registrarse la frecuencia con que ocurren errores humanos y los costos asociados a ellos para que sirvan como fuente de información a la hora de investigar una falla.
- Los costos por la implementación de la metodología serían recuperados con el aumento de la disponibilidad de la flota.
- Se lograría estandarizar las tareas complejas que son susceptibles a cometer errores humanos por parte de quien la ejecuta, y que ocasionan pérdidas económicas en la compañía
- La disminución de las fallas repetitivas reducirían los costos por sobre mantenimiento de aquellas actividades que se ejecutan rutinariamente pero que no aportan a la prevención de las fallas.

6 RECOMENDACIONES

A continuación se presentan algunas recomendaciones a partir de la observación de la situación actual de la flota de mantenimiento de camiones eléctricos EH5000 en Cerrejón.

- Se recomienda crear un formato para la entrega de turno entre supervisores de campo, de manera tal que los detalles de las órdenes de trabajo no registradas en el ERP puedan ser resueltos y no olvidados como consecuencia de un frecuente error humano.
- Se recomienda que la persona encargada de la base de mantenimiento tenga un plan de entrenamiento en taller y en campo para que pueda dar mejor soporte a los técnicos, y además en el sistema de información se pueda registrar el detalle de las fallas.
- Se recomienda a la empresa llevar el análisis RCM hasta el nivel de ítem mantenible de cada uno de los sistemas del camión para desarrollar un plan de mantenimiento más detallado que permita lograr una mayor confiabilidad en la flota.
- Se observó que el análisis de confiabilidad humana Sherpa se puede complementar asociando los costos (perdida de disponibilidad, equipos afectados, personas lesionadas, ausentismo, horas hombre, reproceso, etc.) en los que se incurre si se presenta un error humano durante la ejecución de la tarea analizada, arrojando resultados de carácter financiero, útiles a la hora de tomar de decisiones sobre la estrategia de mantenimiento.

CONCLUSIONES

- Se logró desarrollar un plan de mantenimiento para el sistema de dirección de los camiones eléctricos EH5000 que contempla actividades detalladas hasta el nivel de ítem mantenible del sistema, que en el plan actual no existen y como resultado para la gestión de mantenimiento se fusionaron los planes (el antiguo y el nuevo), estableciendo así actividades preventivas que atacan posibles fallos en el sistema.
- Se evaluó una tarea crítica del plan de mantenimiento con la técnica SHERPA arrojando como resultados: Disminución de probabilidad de fallos por errores humanos, rediseño al procedimiento para la ejecución de la tarea, alistamiento de herramientas en un APL, asignación de áreas para herramientas específicas, gestión visual de etiquetado de herramientas y reacondicionamiento del equipo.
- Se presentaron en un formato las recomendaciones arrojadas por la técnica de fiabilidad humana para evitar la ocurrencia del error humano en la ejecución de la tarea analizada, logrando exponer los beneficios que se obtendrían en la flota de camiones eléctricos si se implementa la metodología planteada.
- Se presentaron recomendaciones a la empresa de los hallazgos que se identificaron durante la recolección y tratamiento de la información con relación a la probabilidad de ocurrencia de error humano en actividades rutinarias.
- La metodología planteada se elaboró con el fin que sea aplicable a cualquier equipo, sistema y/o componente de una empresa, cuyo estatus sea crítico para la cadena de producción, de manera tal que pueda generar procesos de mejora continua en la gestión del mantenimiento.

- Se observó que los esfuerzos en controles y prevención en mantenimiento deben enfocarse principalmente en las tareas que tengan mayor probabilidad de ocasionar los modos de fallo más críticos, teniendo en cuenta que en toda organización los recursos para el mantenimiento son limitados.

BIBLIOGRAFÍA

AGUILAR, José, TORRES, Rocío; y MAGAÑA, Diana. Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. México. Technol. Ciencia Ed. (IMIQ) vol. 25 núm. 1. 2010. 12 p.

AMENDOLA, Luis. La madurez como factor del éxito en la Gestión Integral de Activos Físicos. ASSET MANAGEMENT PAS55. PMM Institute for Learning. [Consultado 04-05-13]. Disponible en <www.globalassetmanagement-amp.com>

_____. Modelo de Confiabilidad Humana en la Gestión de Activos. PMM Institute for Learning. [Consultado 05-06-13]. Disponible en <<http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/notas/0604AmendConf.pdf>>

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. A manager's guide to reducing human errors. Improving human performance in the process industries. API PUBLICATION 770.

BABER, Chris y STANTON, Neville. Task Analysis for Error Identification: Theory, Method and Validation. Brunel University. [Consultado 04-05-13]. Disponible en <<http://bura.brunel.ac.uk/bitstream/2438/1736/4/5091.pdf>>

_____. Human Error Identification Techniques APPLIED TO Public Technology: Predictions Compared with Observed Use. En: ELSEVIER. Applied Ergonomics.1996. Vol.27, No.2, p119-131.

CERREJON. Quienes somos. [Consultado 14-08-13] Disponible en <<http://www.cerrejon.com/site/nuestra-empresa/quienes-somos.aspx>>

1ER CONGRESO MEXICANO DE CONFIABILIDAD & MANTENIMIENTO. (30,31, octubre, 2003: León, Guanajuato, México) Modelo mixto de confiabilidad basado en estadística para la optimización del mantenimiento industrial. Oliverio García Palencia.

16 CONVENCION CIENTIFICA DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA (26-30, noviembre, 2012: La Habana, Cuba) Análisis inicial de la fiabilidad humana en las organizaciones. Daniel Conte, Luis Díaz, Florencia Bertoldi.

DHILLON, B.S y LIU, Y. Human Error in maintenance: a review. En: Journal of quality in maintenance Engineering. 2006. Vol. 12, No.1, p 21-36.

DHILLON, B.S. Human Reliability, Error, and Human Factors in Engineering Maintenance. With reference to Aviation and Power Generation. Boca Ratón, FL: Taylor & Francis Group, LLC.2009. p 63-76.

DOMECH, Jesús. Análisis de la confiabilidad humana en una refinería de petróleo. Uso de metodología borrosa. En: Cuadernos del CIMBAGE. 2010. No. 12, p71-84.

DUNN, Sandy. Managing Human Error in Maintenance. [Consultado 01-05-13] Disponible en <<http://www.uhfg.se/pdf/Artikelarkiv/ManagingHEMaintenance.pdf>>

HARRIS, Don, STANTON, Neville, MARSHALL, Andrew et al. Using SHERPA to predict design-induced error on the flight deck. En: ELSEVIER. Aerospace Science and Technology.2005. No. 9, p525-532.

HITACHI. Technical Manual EH5000ACII Rigid Dump Truck. Guelph: Hitachi Construction Truck Manufacturing, 2009. p 310-337.

HITACHI. Workshop Manual EH5000ACII Rigid Dump Truck. Guelph: Hitachi Truck Manufacturing, 2008. p 468-586.

HITACHI. Operator's Manual EH5000ACII Rigid Dump Truck. Guelph: Hitachi Truck Manufacturing, 2009. p 152, 192, 291-294, 302, 307.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. Petroleum and Natural Gas Industries. Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. ISO 14224.1999.

KIRWAN, Barry, GIBSON, Huw y HICKLING, Brian. Human Error Data Collection a Precursor to the Development of a Human Reliability Assessment Capability in Air Traffic Management. En: ELSEVIER. Reliability Engineering and System Safety.2008. No. 93, p217-233.

LANE, Rhonda; STANTON, Neville y HARRISON, David. Hierarchical Task Analysis to Medication Administration Errors. Brunel University. [Consultado 04-06-13]. Disponible en <http://bura.brunel.ac.uk/bitstream/2438/1732/1/Applying_Hierarchical_Task_Analysis_to_Medication_Administration_Errors_Lane_et_al.pdf>

MASON, Steve. Improving maintenance by reducing human error. En: 14th Annual Human Factors in Aviation Maintenance Symposium.

MENDEZ, Marcos. Análisis de confiabilidad utilizando modelos de componentes genéricos y matrices de propagación de fallas. TESIS DEMAESTRÍA. Cuernavaca: Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Departamento de Ingeniería Electrónica.

MINISTERIO DE TRABAJO Y ASUNTOS SOCIALES ESPAÑA. Fiabilidad humana: Métodos. NTP 377. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo.

_____. Fiabilidad Humana. Evaluación simplificada del error humano (I). NTP619. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo.

_____. Fiabilidad Humana. Evaluación simplificada del error humano (II). NTP620. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo.

_____. Fiabilidad Humana. Evaluación simplificada del error humano (III). NTP621. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo.

NIÑO, José y HERRERO, Jorge. El error humano y el control de las causas de los accidentes. En: Mapfre Seguridad.2004. No. 94

PROSEK, Andrej, y MAVKO, Borut. RELAPS/MOD33. Best estimate analysis for human reliability analysis. En: Science and Technology of nuclear Installations. 2012. ID197193.

REASON, James. Human Error. New York: Cambridge University Press. 1990

RELIABILITY WORLD 2006. (28-31, agosto, 2006: Santa Cruz de la Sierra, Bolivia). La confiabilidad humana en la gestión del mantenimiento. Oliverio García Palencia.

RUIZ-MORENO, Juan y TRUJILLO, Humberto. Modelos para la evaluación del error humano en estudios de fiabilidad de sistemas.En: Anales de Psicología. 2012. Vol 28, No.3, p963-977.

SALMON, P; STANTON, Neville y WALKER, G. Human Factor Methods: A practical guide for Engineering and Design. Ashgate Publishing Company. 2005

SWAIN A.D, GUTTMANN H.E. Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plants Applications. Albuquerque: Sandia National Laboratories. 1983.

SALMON, Paul; LENNE, Michael, STANTON, Neville, et al. Managing error on the open road: the contribution of human error models and methods. En: ELSEVIER. Safety and Science. 2010. No 48, p 1225-1235.

SHRORROCK, Steven y KIRWAN, Barry. Development and Application of a Human Error Identification Tool for Air Traffic Control. En: ELSEVIER. Applied Ergonomics. 2002. No. 33, p319-336.

STANTON, Neville y STEVENAGE, Sarah. Learning to predict human error: Issues of acceptability, Reliability and Validity. En: Ergonomics 1998. Vol.41. No. 11, p 1737-1756.

STANTON, Neville, SALMON, Paul, HARRIS, Don, et al. Predicting pilot error: testing a new methodology and a multi-methods and analysis approach. En: ELSEVIER. Applied ergonomics. 2009. No 40, p 464- 471.