



DOI: <https://doi.org/10.23857/fipcaec.v4i4.129>

Utilización de la auditoría de mantenimiento y el análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD) como herramientas para la identificación de problemas en la gestión de mantenimiento de locomotoras en empresas de ferrocarriles

Use of maintenance audit and analysis of reliability, maintainability and availability (CMD) as tools for the identification of problems in locomotive maintenance management in railroad companies

Uso da auditoria de manutenção e análise de confiabilidade, manutenção e disponibilidade (CMD) como ferramentas para identificação de problemas no gerenciamento de manutenção locomotiva em empresas ferroviárias

Luís Fernando Buenaño-Moyano ¹

lfbuenaño@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-2194-4102>

Wilson Javier Villagrán-Cáceres ²

wvillagran@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-2153-1797>

Carlos José Santillán-Mariño ³

carlos.santillan@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-2976-8366>

Correspondencia: lfbuenaño@epoch.edu.ec

* **Recepción:** 17/ 10/ 2019 * **Aceptación:** 08/11/ 2019 * **Publicación:** 03 /12/ 2019

- ¹ Magíster en Gestión del Mantenimiento Industrial, Ingeniero Automotriz, Profesor de Educación Musical - Nivel Técnico Superior, Tecnólogo en Medios Didácticos Musicales, Docente de la Facultad de Mecánica en la Carrera de Ingeniería Automotriz, Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- ² Magíster en Matemática Básica, Diploma Superior en Gestión Educativa, Ingeniero en Electrónica y Computación, Tecnólogo en Informática Aplicada, Docente de la Facultad de Mecánica en la Carrera de Ingeniería Automotriz, Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- ³ Magíster en Ciencias Mención Diseño Mecánico, Magíster en Docencia Universitaria e Investigación Educativa, Docente de la Facultad de Mecánica en la Carrera de Ingeniería Automotriz, Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Resumen

Se propone una metodología adaptada a la medición de indicadores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad en locomotoras diésel-eléctricas complementándose en una auditoría de gestión de mantenimiento para lograr la identificación de problemas administrativos. El diseño de la investigación es sistemática, no experimental, y empírica. El tipo de estudio es descriptivo, evaluativo, y de campo, con un nivel de investigación inicial y realizado en Ferrocarriles del Ecuador Empresa Pública (FEEP). Se estudian dos variables: estado actual de la Gestión de Mantenimiento, a través de una encuesta de auditoría, aplicada a siete miembros directivos del departamento de mantenimiento. Para la segunda variable Disponibilidad de las locomotoras, se aplica la metodología para medición CMD en ocho locomotoras analizándose los datos de falla provistos por la empresa. Los resultados obtenidos en la auditoría revelan un estado regular de la gestión con un 55,78%, mientras que el análisis CMD proyecta índices bajos de confiabilidad correctiva de 29,68%, confiabilidad preventiva de 39,77%, mantenibilidad correctiva de 85,79%, mantenibilidad preventiva de 68,80% y una disponibilidad alcanzada de 73,30%. Los resultados permitieron identificar los problemas administrativos principalmente en el mantenimiento preventivo y programado, facultándole a la organización el generar un modelo de gestión de mantenimiento adecuado a su realidad.

Palabras clave: Auditoría; confiabilidad; disponibilidad; gestión; mantenimiento.

Abstract

A methodology adapted to the measurement of reliability, maintainability and availability indicators in diesel-electric locomotives is proposed, complementing a maintenance management audit to achieve the identification of administrative problems. The research design is systematic, not experimental, and empirical. The type of study is descriptive, evaluative, and field, with an initial level of research and conducted in Ferrocarriles del Ecuador Public Company (FEEP). Two variables are studied: current state of Maintenance Management, through an audit survey, applied to seven management members of the maintenance department. For the second variable Availability of locomotives, the methodology for CMD measurement in eight locomotives is applied, analyzing the fault data provided by the company. The results obtained in the audit



reveal a regular management status with 55.78%, while the CMD analysis projects low corrective reliability rates of 29.68%, preventive reliability of 39.77%, corrective maintainability of 85, 79%, preventive maintainability of 68.80% and an availability reached of 73.30%. The results allowed to identify administrative problems mainly in preventive and scheduled maintenance, enabling the organization to generate a maintenance management model appropriate to its reality.

Keywords: Audit; reliability; availability; management; maintenance.

Resumo

É proposta uma metodologia adaptada à medição de indicadores de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade em locomotivas diesel-elétricas, complementando uma auditoria de gerenciamento de manutenção para obter a identificação de problemas administrativos. O desenho da pesquisa é sistemático, não experimental e empírico. O tipo de estudo é descritivo, avaliativo e de campo, com um nível inicial de pesquisa e realizado na Ferrocarriles del Ecuador Public Company (FEEP). Duas variáveis são estudadas: estado atual do Gerenciamento de Manutenção, por meio de uma pesquisa de auditoria, aplicada a sete membros do departamento de manutenção. Para a segunda variável Disponibilidade de locomotivas, é aplicada a metodologia de medição de CMD em oito locomotivas, analisando os dados de falhas fornecidos pela empresa. Os resultados obtidos na auditoria revelam um status de gerenciamento regular com 55,78%, enquanto a análise CMD projeta baixas taxas de confiabilidade corretiva de 29,68%, confiabilidade preventiva de 39,77%, manutenção corretiva de 85, 79%, manutenção preventiva de 68,80% e disponibilidade alcançada de 73,30%. Os resultados permitiram identificar problemas administrativos principalmente na manutenção preventiva e programada, possibilitando à organização gerar um modelo de gerenciamento de manutenção adequado à sua realidade.

Palavras-chave: Auditoria; confiabilidade; disponibilidade; gestão; manutenção.

Introducción

En la actualidad el sector ferroviario, ha empezado a considerar la aplicación de métodos relacionados con la evaluación de la confiabilidad de sus activos, este tipo de estudios consideran

términos como fiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad. El objetivo radica en optimizar los modelos de gestión de mantenimiento aplicables a su realidad, logrando una eficiencia administrativa que les permita asegurar niveles aceptables de calidad en el mantenimiento, sin embargo, debe mencionarse que este tipo de estudios no es de los más explotados en el sector, siendo el área industrial en el que más se ha desarrollado este tipo de herramientas.

Un modelo adecuado de gestión de mantenimiento para una empresa de ferrocarriles, le permitirá asegurar una producción regular, ya que se asegura que su interrupción por paradas inesperadas de las locomotoras no ocurra, además de que un correcto modelo de gestión del departamento de mantenimiento permitirá optimizar los tiempos de reparación y mantenimiento, los cuales también impactan en los niveles de producción de la empresa.

Un análisis CMD (Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad), permite pronosticar la producción perdida y la indisponibilidad de un proceso de producción, de acuerdo con su configuración, a la confiabilidad de sus componentes, a las políticas de mantenimiento, al recurso disponible y a la filosofía operacional (Acevedo N., y otros, 2007).

El estudio que se presenta busca relacionar los resultados obtenidos del aplicar una auditoría de mantenimiento y el análisis de indicadores CMD, para determinar problemas en la gestión de mantenimiento en empresas de ferrocarriles, y la búsqueda del diseño de modelos de gestión eficientes para este tipo de empresas.

En primera instancia para el estudio se plantea la hipótesis: “El estado actual de la Gestión de Mantenimiento aplicada en las locomotoras tipo BBB 2400 incide en la disponibilidad de las locomotoras tipo BBB 2400 de FEEP”, de lo cual se desprende que tanto la auditoría de mantenimiento como el análisis CMD permiten conocer los problemas de la gestión que afectan esa disponibilidad.

El “Estado actual de la Gestión de mantenimiento aplicada a las locomotoras tipo BBB 2400” es la variable independiente y se evalúa a través de una encuesta de auditoría de mantenimiento, mientras que la variable dependiente “Disponibilidad de las locomotoras tipo BBB 2400” se mide a través de la metodología para el análisis de indicadores de mantenimiento CMD. Posterior a



esto, los resultados obtenidos del aplicar los instrumentos para la evaluación de cada una de las variables, son los que generarán los resultados esperados que en este caso son el identificar los problemas de la gestión que afectan los indicadores CMD en dicha empresa.

Desarrollo

Importancia del Problema

Ferrocarriles del Ecuador Empresa Pública (FEEP), es la encargada del sistema ferroviario del Ecuador por lo que ha creado 4 filiales con una flota de 8 locomotoras diésel eléctricas para cubrir 12 rutas turísticas, la empresa declara como misión el “administrar y operar con eficiencia el sistema ferroviario turístico – patrimonial y contribuir al desarrollo socioeconómico del país, mediante el fortalecimiento de las actividades productivas, que fomenten el turismo y la valoración histórico-patrimonial, con responsabilidad social.” (FEEP, 2015).

Al ser una locomotora un activo con un valor real o potencial para la empresa, se debe procurar que este alcance una larga vida útil la cual considerando que ya tiene 20 años debe asegurar además una disponibilidad que permita cumplir con calidad los servicios ofertados por la empresa, haciéndose necesario el aplicar las nuevas tendencias seguidas por el sector ferroviario mundial en lo que se refiere a la gestión de mantenimiento pero para aplicarlo adecuadamente al sector es indispensable el conocer primero cuáles son los problemas reales que afectan la administración que se está llevando a cabo en la empresa en cuestión para lo cual se hace necesario primero el diseñar herramientas adecuadas que faciliten la identificación de problemas de gestión y que contribuyan al planteamiento de soluciones a la administración de mantenimiento.

Una flota de ferrocarriles es comparable a una flota vehicular, sin embargo una locomotora constituye muchos más sistemas electrónicos, mecánicos y neumáticos de los que se encuentra en una flota vehicular de transporte por carretera e inclusive tampoco en una flota vehicular se logra encontrar una metodología que permita analizar la gestión de mantenimiento de flota aplicándose muchas veces herramientas diseñadas y adaptadas al área industrial, lo cual muchas veces complica el aporte de soluciones al sector.

Aquí es en donde radica la importancia del estudio realizado en esta empresa, la cual puede ser aplicada a otro tipo de empresas ferroviarias a nivel regional, e inclusive el hacerse extensivo a empresas que manejan flotas vehiculares, y en especial de maquinaria pesada que deseen aplicar la ingeniería de fiabilidad para mejorar los resultados de producción.

Fundamentación Teórica

- ***Confiabilidad***

Se refiere a la medida de la confiabilidad de un equipo es la frecuencia con la cual ocurren las fallas. Si no existen fallas, el equipo sería 100% confiable; si la frecuencia de fallas es muy baja, entonces la confiabilidad del equipo es aún aceptable, pero si es muy alta, el equipo es poco confiable (Mora Gutiérrez, 2009).

Mantenibilidad

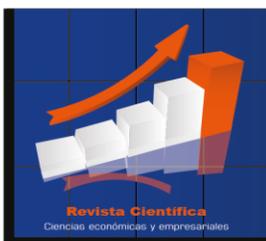
La mantenibilidad, es la propiedad de que una máquina, equipo o un sistema pueda ser reparado a una condición especificada en un período de tiempo dado, en tanto su mantenimiento sea realizado de acuerdo con ciertas metodologías y recursos determinados con anterioridad (Torres, 2010).

Disponibilidad

La disponibilidad es la proporción de tiempo durante la cual un sistema o equipo estuvo en condiciones de ser usado (Torres, 2010). Según López (2012) otra definición común en mantenimiento para la disponibilidad es: el porcentaje de equipos o sistemas útiles en un determinado momento, frente al parque total de equipos o sistemas.

Disponibilidades de mayor uso empresarial

Entre las disponibilidades de mayor uso empresarial se encuentran: la disponibilidad genérica (D_G), usada principalmente en organizaciones que no manejan CMD, disponibilidad inherente (D_I), usada cuando se desea controlar las actividades de mantenimientos no planeados, la disponibilidad alcanzada (D_A), excelente cuando se busca controlar las tareas planeadas y las correctivas por separado, la disponibilidad operacional (D_O) para vigilar de cerca los tiempos de demoras administrativas o de recursos físicos o humanos y la disponibilidad operacional



generalizada (D_{OG}) que se usa en equipos con mucho tiempo de operación en que funcionan mas no producen (Mora Gutiérrez, 2009).

Gestión de Mantenimiento

La norma EN13306 define a la gestión de mantenimiento como “todas las actividades de la gestión que determinan los objetivos del mantenimiento, las estrategias y las responsabilidades, y las realizan por medio de planificación del mantenimiento, control y supervisión del mantenimiento, mejora de los métodos en la organización incluyendo los aspectos económicos.

El propósito de la gestión de mantenimiento es la optimización de la funcionalidad de los activos de la empresa en función de los lineamientos, objetivos, estrategias y responsabilidades planteadas por la organización (Márquez, 2010).

La gestión de mantenimiento tiene una injerencia directa sobre los resultados de indicadores de CMD de una empresa, pues como afirma Rey citado por Mora (2009), la eficiencia con que la gestión de mantenimiento contribuye para alcanzar la producción total mediante la dotación de capacidades y la fiabilidad del parque industrial, se plasma al maximizar la disponibilidad de los equipos.

Auditoría del mantenimiento

La efectividad de la gestión del mantenimiento sólo puede ser evaluada y medida por el análisis exhaustivo de una amplia variedad de factores que, en su conjunto, constituyen la aportación del mantenimiento al sistema de producción. Este procedimiento de evaluación se denomina con el término de auditoría, que puede definirse como una “revisión sistemática de una actividad o de una situación para evaluar el cumplimiento de las reglas o criterios objetivos a que aquellas deben someterse” (Parra Márquez & Crespo Márquez, 2012).

Es importante señalar, que no hay fórmulas simples para “medir” el mantenimiento, tampoco hay reglas fijas o inmutables con validez para siempre y en todos los casos. Los resultados de las técnicas de auditorías aplicadas al diagnóstico de la efectividad del mantenimiento deben ayudar a mejorar la rentabilidad del sistema de producción y a disminuir la incertidumbre en la toma de decisiones del proceso de gestión del mantenimiento (Parra Márquez & Crespo Márquez, 2012).

Metodología

El tipo de estudio realizado en la presente investigación es descriptivo, evaluativo, de campo y aplicado, el cual para ser realizado obedece a un diseño previo de la investigación el cual es no experimental, sistemático y empírico ya que se realiza sin manipular intencionalmente una variable independiente. Se desea evaluar la gestión de mantenimiento de Ferrocarriles del Ecuador Empresa Pública, sin intervenir en su desarrollo y describiendo indicadores CMD de mantenimiento obtenidos de las locomotoras diésel eléctricas, esto se plantea debido a que estos indicadores son resultado de la aplicación de un modelo de gestión de mantenimiento y apoyándose de una auditoría puede revelar cuales son los problemas que enfrenta el modelo aplicado convirtiéndose estas dos herramientas en las ideales para el estudio propuesto.

Esta investigación aplica el método científico, el cual resulta adecuado debido a que obedece a un plan o conjunto ordenado de acciones como: seleccionar, formular y delimitar el problema, proponer posibles explicaciones y respuestas, requerir de un marco teórico, formular hipótesis, requerir de métodos, técnicas e instrumentos para la recolección de datos, presentar y generalizar los resultados. Es utilizado también el método analítico debido a que este método consiste en revisar o analizar de forma ordenada los datos proporcionados por los talleres de mantenimiento de FEED, logrando filtrar los datos útiles para el cálculo y modelación probabilística de los indicadores CMD y su posterior análisis.

La investigación evalúa dos variables que guardan relación y la una es consecuencia de la otra, planteándose en primera instancia la hipótesis a investigar la cual es la siguiente: “El estado actual de la Gestión de Mantenimiento aplicada en las locomotoras tipo BBB 2400 incide en la disponibilidad de las locomotoras tipo BBB 2400 de FEED” considerándose a la variable independiente a el “Estado actual de la Gestión de mantenimiento aplicada a las locomotoras tipo BBB 2400”, y a la variable dependiente Disponibilidad de las locomotoras tipo BBB 2400”, el estudio busca el interpretar los resultados de las herramientas que se proponen para ambas variables con la finalidad de determinar los aspectos de las gestión de mantenimiento que influyen sobre el indicador de disponibilidad.

Se debe evaluar cada una de las variables para los cuales se plantean metodologías adecuadas para cada una, así como sus correspondientes técnicas, instrumentos y población a fin de que los



resultados obtenidos sean los esperados, se detalla a continuación el proceso de evaluación para cada una de las variables.

Estudio de la variable independiente “Estado actual de la gestión de mantenimiento aplicada en los talleres de las filiales de FEEP”

Para la evaluación de la variable independiente, se decide utilizar una auditoría de mantenimiento, que dado a que no existe un modelo claro para realizarlo específicamente a una empresa ferroviaria de las características de FEEP se diseña una encuesta a siete miembros de la organización entre jefes de taller y responsables de locomotoras de cada uno de los talleres de mantenimiento de las filiales a las cuales se encuentran asignadas las locomotoras que operan en cada una de las rutas que se ofrece en el Ecuador.

El cuestionario ha sido diseñado para evaluar aspectos de la gestión de mantenimiento que influyen en los tiempos de mantenimientos correctivos y planeados, cuyos resultados son los que influyen en el resultado de los indicadores CMD, y que se enmarcan dentro de las limitaciones de la investigación.

Los aspectos evaluados se han establecido en las siguientes áreas y subáreas:

- Área I: Organización del Mantenimiento de las locomotoras
 - Funciones y responsabilidades de la función de mantenimiento
 - Autoridad y Autonomía de la organización de mantenimiento en el taller
 - Sistema de Información manejado en el taller
- Área II: Planificación del mantenimiento de las locomotoras
 - Objetivos y metas
 - Políticas para la planificación
 - Control de Evaluación
- Área III: Mantenimiento programado
 - Planificación del mantenimiento programado
 - Programación e Implantación del mantenimiento programado
 - Control y Evaluación del mantenimiento programado
- Área IV: Mantenimiento preventivo

- Determinación de parámetros para el mantenimiento preventivo
- Planificación del mantenimiento preventivo
- Programación e Implantación del mantenimiento preventivo
- Control y Evaluación del mantenimiento preventivo
- Área V: Mantenimiento por avería (Correctivo)
 - Atención a las fallas
 - Supervisión y Ejecución
 - Información sobre las averías

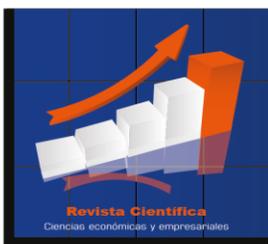
El instrumento a partir del cual se realiza la recolección y procesamiento de la información es formularios de Google, en el cual se diseñó el cuestionario correspondiente en el cual cada área tiene un mismo peso porcentual, ya que se considera que cada una es indispensable para lograr obtener resultados eficientes en cuanto a disponibilidad de las locomotoras. Cada pregunta se evalúa en una escala del 0 al 5 y su codificación se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Codificación de las preguntas usada en la encuesta

Escala de calificación	Porcentaje para ponderación	Equivalencia para el diagnóstico	Código de color
5	100	Excelente	
4	80	Bueno	
3	60	Regular	
2	40	Deficiente	
1	20	Malo	
0	0	No existe	

Fuente: Autor

La población a la cual se dirigió la encuesta son siete funcionarios de la empresa entre jefes de taller de cada una de las filiales de FEPP las cuales son cuatro en todo el país y dos encargados de mantenimiento de locomotora. La participación de estos funcionarios en el estudio resulta idónea y adecuada ya que son ellos los que ejecutan el modelo de gestión de mantenimiento de la



empresa para el funcionamiento de las ocho locomotoras con las que la empresa contaba al momento del estudio.

Estudio de la variable dependiente “Disponibilidad de las locomotoras tipo BBB 2400”

Debido a que no existe exactamente una metodología para la medición de CMD en locomotoras, se diseña una a partir de la aplicación del modelo universal para pronosticar CMD propuesto por Mora (2009) y que ha sido optimado para ser aplicado con cualquier software estadístico que sea capaz de generar distribuciones estadísticas a partir de un conjunto de datos.

Esta metodología sigue seis etapas y la población a la que se aplica son ocho locomotoras diésel-eléctricas con las que cuenta FEEP, y que han sido distribuidas en todo el país, los resultados de los indicadores de mantenimiento son resultado del modelo de gestión que la empresa aplica en todas sus filiales:

Primera etapa: obtención de los datos, se refiere a los datos cuyo origen son los históricos de fallas y registros de mantenimiento de las locomotoras, corresponden a tiempos útiles, fallas, reparaciones y mantenimiento. Para el estudio se obtienen los datos y se discriminan a partir de los “registros cronológicos de órdenes de trabajo”.

Segunda etapa: preparación de los datos, a partir del análisis de los datos obtenidos se podrá elegir cuál es la disponibilidad factible de calcular, en esta etapa se separa lo correctivo de lo planeado.

En el estudio se separa la información correspondiente a mantenimientos correctivos y mantenimientos preventivos o planeados. Los datos corresponden a TBMc (Tiempo entre mantenimiento correctivo) y TTR (tiempo para reparar) véase la tabla 2, de la misma manera se obtienen los correspondientes a TBMp (Tiempo entre mantenimiento planeado o preventivo) y TMp (Tiempo de mantenimiento preventivo).

Tabla 2. TBMc y TTR obtenidos del tratamiento de datos de los registros de mantenimiento

FECHA	TBMc	TTR
13/1/2015	68,1	7,5
26/1/2015	49,6	2

5/1/2015	130	1
14/1/2015	23	0,5
19/1/2015	65,7	13,75
26/1/2015	45,8	4,25
5/1/2015	311	1
26/1/2015	94	2
19/1/2015	41	5
26/1/2015	45	4
6/1/2015	74	6

Fuente: Autor

Tercera etapa: elección de la disponibilidad factible de calcular o deseada de utilizar, de acuerdo a los datos preparados de la segunda etapa se escoge la disponibilidad factible de calcular entre las disponibilidades de mayor uso empresarial.

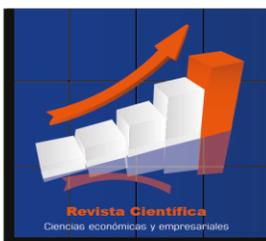
La disponibilidad factible de calcular para el conjunto de datos es la disponibilidad alcanzada la cual requiere se cuenten con los indicadores:

- **Indicadores de confiabilidad**, MTBM, el cual se calcula a partir del MTBMc y MTBMp.
- **Indicadores de Mantenibilidad**, \overline{M} , el cual se calcula a partir de MTTR y Mp.

Para el cálculo se utiliza la expresión:

$$D_A = \frac{MTBM}{MTBM + \overline{M}} = \frac{\frac{1}{\frac{1}{MTBMc} + \frac{1}{MTBMp}}}{\frac{1}{\frac{1}{MTBMc} + \frac{1}{MTBMp}} + \frac{MTTR + Mp}{\frac{1}{\frac{1}{MTBMc} + \frac{1}{MTBMp}}}} \quad (1)$$

En donde MTBM es el tiempo medio entre mantenimientos, MTBMc es el tiempo medio entre mantenimientos correctivos, el MTBMp es el tiempo medio entre mantenimientos preventivos, \overline{M} es tiempo medio de mantenimiento activo, MTTR es tiempo medio para reparar y Mp es tiempo neto medio para ejecutar tareas proactivas de mantenimiento planeados.



Cuarta etapa: Análisis de Weibull, consiste en la realización de la aplicación de la distribución de weibull al conjunto de datos, para ello se hace uso de software estadístico que incluso puede ir desde una hoja de cálculo de Excel hasta software específico como minitab. En esta etapa se debe decidir entre el utilizar el método de mínimos cuadrados o el método de máxima verosimilitud (MLE) para el ajuste de la distribución.

Desde un punto de vista estadístico, la MLE se recomienda generalmente para muestras grandes debido a que es versátil, aplicable a la mayoría de los modelos y a los diferentes tipos de datos y produce las estimaciones más precisas (Minitab, 2015) y dada la gran cantidad de datos que se manejaron en este estudio y a la flexibilidad del software estadístico utilizado en este caso minitab, el MLE fue el seleccionado para el análisis de weibull.

Con el ajuste de los datos de la investigación a la distribución de weibull y el posterior análisis de Minitab considerando que este programa por defecto arroja los valores de mediana de las distribuciones ajustadas, se determina rápida y eficazmente los valores de MTBMc, MTTR, MTBmp y Mp de los conjuntos de datos en el análisis.

Quinta Etapa: Validación de la distribución de Weibull o ajuste de una distribución alternativa, en esta metodología se tiene la ventaja de que desde el inicio el análisis de weibull es utilizado por lo que se puede determinar las 3 etapas de la curva de Davies, sin embargo, se debe asegurar que el ajuste sea bueno por lo que se debe aplicar las pruebas de bondad de ajuste, las cuales se puede ejecutar en el software estadístico disponible que en el caso del estudio fue Statgraphics.

Las pruebas de bondad de ajuste son:

- Kolmogórov-Smirnov
- Anderson-Darling

Si la distribución de weibull no cumple las pruebas de bondad de ajuste, se deberá probar con otras distribuciones usadas en fiabilidad y que cumplan con las pruebas especificadas.

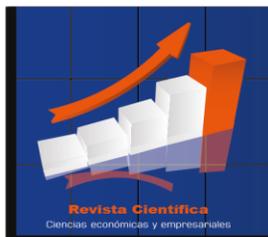
Luego del ajuste de la distribución de weibull en el conjunto de datos sometidos a análisis, se registran los valores obtenidos en una tabla diseñada para el efecto. Es necesario sin embargo que los resultados cumplan con las pruebas de bondad de ajuste para asegurar la fiabilidad de los

resultados; dado que el método que se usa para el ajuste de los datos es el de máxima verosimilitud, los estadísticos de prueba que se realizaron son el test de Kolmogórov-Smirnov y Anderson-Darling y se realiza para cada indicador, en la Tabla 3 se muestra el cálculo para MTBMc.

Sexta etapa: Cálculos CMD, En esta etapa se realizan todos los cálculos de los indicadores CMD a partir de las distribuciones obtenidas, y del tipo de disponibilidad elegida para calcular. Se obtendrán los parámetros necesarios para obtener las curvas de densidad de fallas $f(t)$, acumulada de fallas $F(t)$, confiabilidad $R(t)$, tasa de fallas $\lambda(t)$, la función de mantenibilidad $M(t)$, y las medidas requeridas para el cálculo de la disponibilidad elegida.

Tabla 3. Resultados del cálculo estadístico de MTBMc

Período	MTB Mc	PRUEBAS ANÁLISIS WEIBULL				Distribución asumida	PRUEBAS DISTRIBUCIÓN ASUMIDA			
		ANDERSON DARLING		KOLMOGOROV SMIRLOV			ANDERSON DARLING		KOLMOGOROV SMIRLOV	
		Valor-P	Cumple	Valor-P	Cumple		Valor-P	Cumple	Valor-P	Cumple
Ene-15	87,298	≥ 0.10	Si	0,679989	Si	Weibull				
Feb-15	63,978	≥ 0.10	Si	0,5975	Si	Weibull				
Mar-15	66,35	≥ 0.10	Si	0,263061	Si	Weibull				
Abr-15	72,05	≥ 0.10	Si	0,177872	Si	Weibull				
May-15	66,23	< 0.10	Si	0,0477188	No	Lognormal 3p	≥ 0.10	Si	0,267695	Si
Jun-15	62,8	< 0.05	No	0,0218893	No	Lognormal 3p	≥ 0.10	Si	0,160264	Si
Jul-15	62,5	< 0.05	No	0,0145348	No	Lognormal 3p	≥ 0.10	Si	0,160264	Si



Ago-15	67,5 3	<0.05	No	0,01387 55	No	Lognormal 3p	<0.10	Si	0,196864	Si
Sept-15	70,2 9	<0.01	No	0,01069 69	No	Lognormal 3p	<0.10	Si	0,150976	Si
Oct-15	66,0 3	<0.01	No	0,00844 826	No	Lognormal 3p	>=0.10	Si	0,192194	Si
Nov-15	62,4 9	<0.01	No	0,00412 507	No	Lognormal 3p	<0.10	Si	0,105044	Si
Dic-15	61,6 9	<0.01	No	0,00148 543	No	Loglogística 3p	>=0.10	Si	0,208313	Si
Ene-16	61,1 4	<0.01	No	0,00195 59	No	Loglogística 3p	>=0.10	Si	0,273448	Si
Feb-16	59,2 6	<0.01	No	0,00139 368	No	Loglogística 3p	>=0.10	Si	0,246641	Si
Mar-16	57,6 3	<0.01	No	0,00066 7761	No	Loglogística 3p	>=0.10	Si	0,266056	Si

Fuente: Autor

Se debe resaltar que el modelo de gestión de mantenimiento y los planes de mantenimiento aplicados en cada uno de los talleres a las 8 locomotoras es el mismo. El análisis de CMD se realizó a las 8 locomotoras que componen la flota de FEED, tomando en consideración que el contexto operacional en el que se desenvuelven son las rutas asignadas por FEED. La metodología propuesta fue aplicada a los datos proporcionados por FEED, las dos variables propuestas son analizadas y sus resultados son comparados para establecer los problemas que se presentan en la gestión.

Resultados

Resultados de la variable independiente “Estado actual de la gestión de mantenimiento aplicada en los talleres de las filiales de FEED”

Luego de aplicar la encuesta se logró evaluar las cinco áreas de interés referentes a la gestión de mantenimiento y a los indicadores CMD mencionados anteriormente. De un total alcanzable del 100%, el puntaje que alcanza la gestión de mantenimiento de FEED es del 55,78% lo que la ubica en una situación global de “Regular” de acuerdo a la escala utilizada véase la tabla 1. El área IV referente al Mantenimiento Preventivo es la que tiene la más baja calificación con un 48,63% y le sigue el Área III. Mantenimiento Programado con el 56,59% de calificación de acuerdo con los resultados.

Tabla 4. Resultados de la encuesta

Resultados de la Evaluación de la Gestión de Mantenimiento	Porcentaje Alcanzado Aspecto (100%)	Porcentaje Alcanzado Área (100%)	Puntaje	Situación
Área I. Organización del Mantenimiento para las locomotoras de FEED				
Funciones y responsabilidades de la función de mantenimiento	53,14	59,94	40,06	Regular
Autoridad y Autonomía de la organización de mantenimiento en el taller	69,52			
Sistema de Información manejado en el taller	57,14			
Área II. Planificación de Mantenimiento				
Objetivos y metas	59,05	56,76	43,24	Regular
Políticas para la planificación	52,38			
Control de Evaluación	58,86			
Área III. Mantenimiento Programado				
Planificación del mantenimiento programado	57,14	56,59	43,41	Regular
Programación e Implantación del mantenimiento programado	50,71			



Utilización de la auditoría de mantenimiento y el análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD) como herramientas para la identificación de problemas en la gestión de mantenimiento de locomotoras en empresas de ferrocarriles

Control y Evaluación del mantenimiento programado	61,90			
Área IV. Mantenimiento Preventivo				
Determinación de parámetros para el mantenimiento preventivo	43,43	48,63	51,38	Regular
Planificación del mantenimiento preventivo	44,29			
Programación e Implantación del mantenimiento preventivo	45,36			
Control y Evaluación del mantenimiento preventivo	61,43			
Área V. Mantenimiento por Avería (Correctivo, no planeado)				
Atención a las fallas	56,99	56,99	43,01	Regular
Supervisión y Ejecución	60,26			
Información sobre las averías	60,00			
Total Porcentual Alcanzado		55,78	44,22	Regular

Fuente: Autor

Resultados de la variable dependiente “Disponibilidad de las locomotoras tipo BBB 2400”

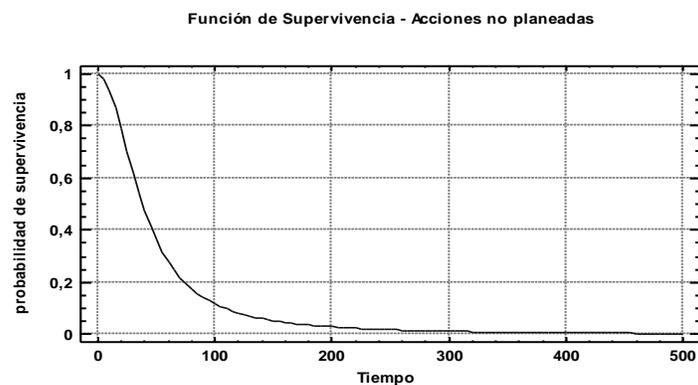
Se requiere la mensualización de los cálculos para establecer las curvas para el análisis, y el cálculo acumulado de los resultados para la modelación de las curvas de los históricos de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad.

El análisis y la posterior presentación de los datos se realiza en períodos mensuales; lo cual es apropiado para lograr estudiar y comprender el comportamiento de la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad alcanzada de la flota de locomotoras de FEEP durante el año 2015 y el primer trimestre de 2016. El período de estudio designado se estimó adecuado, ya que el número de datos considerado (mayor a 31), da el suficiente soporte estadístico para obtener resultados reales; además se desea estudiar el efecto que tiene la gestión de mantenimiento aplicada a partir del año 2015, en el resultado de los indicadores CMD de la flota de locomotoras.

Del cálculo de distribuciones estadísticas aplicadas a los datos y mostradas en la Tabla 3, se puede analizar las curvas de distribución acumulada y determinar las medias, valores que representan los valores de confiabilidad y mantenibilidad de la flota.

En el Gráfico 1 se puede apreciar las curvas estadísticas para la confiabilidad influenciada por mantenimientos correctivos la cual se obtiene a partir de una distribución loglogística de tres parámetros, y mediante la cual se puede obtener un MTBMc de 57,63 h; esto quiere decir que la media de mantenimientos correctivos ocurre a ese tiempo, la confiabilidad de la flota asociada al MTBMc es del 29,68% y la probabilidad de falla o no confiabilidad es del 70,32%.

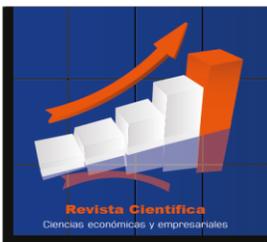
Gráfico 1. Función de confiabilidad influenciada por mantenimientos correctivos del análisis integral de la flota.



Fuente: Autor

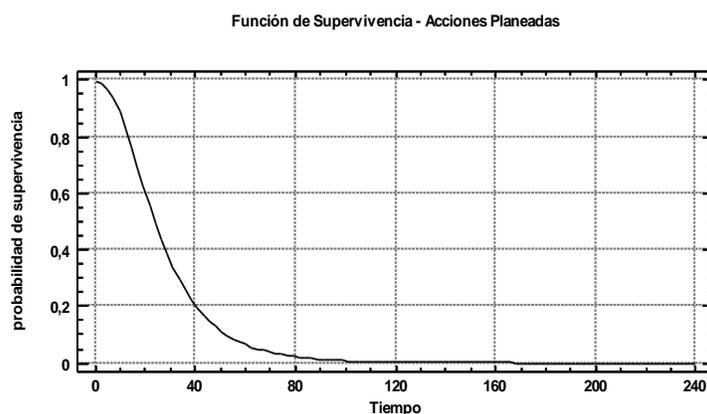
En el Gráfico 2, se muestra el comportamiento de los mantenimientos planeados, siendo la distribución lognormal de 3 parámetros la que mejor se ajustó a los datos, a partir de esta distribución se obtiene un MTBMP de 28,18 h por lo que la probabilidad de funcionamiento sin que tengan que producirse acciones planeadas es del 39,77%. El indicador obtenido indica que los mantenimientos preventivos se realizan a esa media de tiempo; pero se deduce claramente que las acciones planeadas que se ejecutan no son capaces de evitar eficazmente la necesidad de realizar actividades correctivas.

El análisis debido a la confiabilidad influenciada por los mantenimientos correctivos y planeados, indica que la indisponibilidad de la flota imputable a fallas que requieren acciones correctivas son mayores a las debidas por la ejecución de mantenimientos planeados, esto es muy evidente debido a que los resultados al comparar el MTBMP de 28,18 h con el MTBMc de 57,63 h se



determina que la ejecución de las acciones planeadas no logra controlar completamente las fallas en la flota.

Gráfico 2. Función de Confiabilidad en mantenimientos planeados.



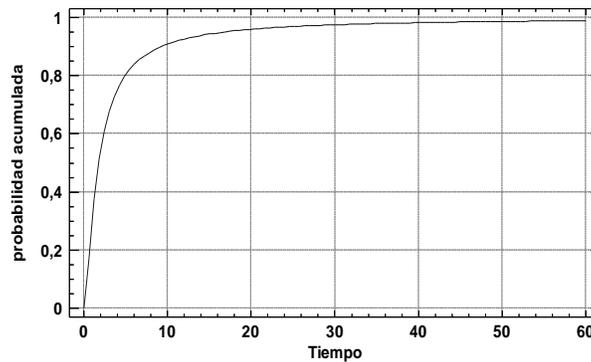
Fuente: Autor

En cuanto a lo que tiene que ver a las funciones de mantenibilidad, la que es debida a las acciones correctivas o reparaciones (Gráfico 3), se obtiene de la distribución estadística loglogística de 3 parámetros, de la cual se puede calcular un MTTR de 6,72 h; lo que representa la duración promedio que tienen las actividades de reparación cuando ocurren las fallas.

El valor de mantenibilidad asociado al MTTR calculado expresa que el 85,79% de las veces que se dan reparaciones en la flota, estas se completan hasta en 6,72 h. El lograr una probabilidad del 99% de que las funciones de la flota se recuperen se da a las 61 h, lo cual sería prácticamente el máximo valor en el cual se puedan terminar las reparaciones.

Gráfico 3. Función de mantenibilidad en las acciones correctivas.

Distribución Acumulada - Acciones no Planeadas



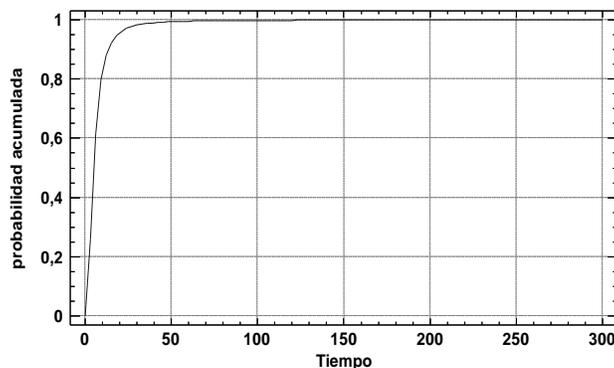
Fuente: Autor

La función de mantenibilidad obtenida en el Gráfico 4, a partir de los datos de tiempos de ejecución de mantenimiento en cuanto a las acciones planeadas se ajusta adecuadamente a la distribución log logística de 3 parámetros y da como resultado un valor de M_p de 6,93h mostrando una probabilidad de 68,80% de que las acciones planeadas se ejecuten en no más de 6,93 h y que el 99% se ejecutarían al cumplirse 38,48h.

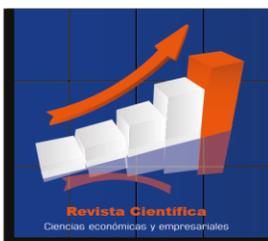
Las acciones planeadas son resultado de las decisiones del departamento de mantenimiento y son realizadas en base al plan de mantenimiento establecido y a los procedimientos y políticas que el modelo de gestión determina. El tiempo en que se ejecutan las acciones de mantenimiento planeado es importante ya que genera indisponibilidad del sistema y se puede apreciar que no están siendo lo eficaces que se desearía.

Gráfico 4. Función de mantenibilidad en las acciones planeadas o preventivas.

Distribución Acumulada - Acciones Planeadas



Fuente: Autor



Se debe mencionar que las acciones planeadas no están cumpliendo con su objetivo a cabalidad, ya que se demuestra que las fallas no están siendo totalmente controladas; la estrategia a seguir debe ser el detectar cuáles son las fallas recurrentes y en que sistemas se dan para incorporar o actualizar las acciones planeadas que se encuentran en el plan de mantenimiento.

En la Tabla 5 se muestran los resultados de los indicadores a partir del cálculo estadístico de sus medias a través de software estadístico y el análisis de sus gráficas.

Tabla 5. Resultados estadísticos de los indicadores.

Indicador estadístico CMD	Probabilidad del indicador	Media acumulada del indicador	Distribución estadística
Confiabilidad influenciada por mantenimientos correctivos	29,68%	57,63 h	Loglogística 3p
Confiabilidad influenciada por mantenimientos planeados	39,77 %	28,18 h	Lognormal 3p
Mantenibilidad influenciada por acciones no planeadas	85,79 %	6,72 h	Loglogística 3p
Mantenibilidad influenciada por actividades planeadas	68,80 %	6,93 h	Loglogística 3p

Fuente: Autor

La medición de la disponibilidad alcanzada se presenta en la tabla 6 y se consigue después de registrar los datos obtenidos de las mediciones de cada indicador a partir del ajuste de distribuciones de forma acumulada y el aplicar la fórmula de cálculo (1). Aquí se observa como la disponibilidad en el año y tres meses de análisis desciende desde un 81,04% hasta un 73,30%

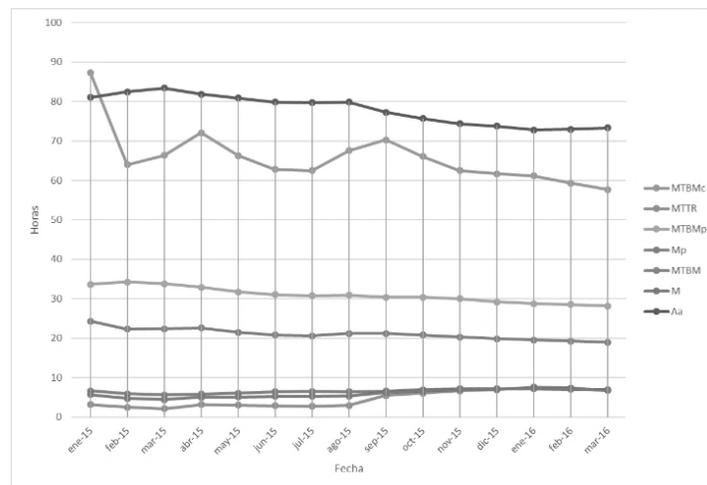
Tabla 6. Resultados de la medición de los indicadores CMD y de la disponibilidad alcanzada de la flota.

PERÍODO	MTBMc	MTTR	MTBMp	Mp	MTBM	\bar{M}	D _A
Ene-15	87,298	3,13	33,62	6,66	24,27	5,68	81,04
Feb-15	63,978	2,53	34,22	5,93	22,30	4,75	82,45
Mar-15	66,35	2,12	33,8	5,64	22,39	4,45	83,42
Abr-15	72,05	3,17	32,89	5,86	22,58	5,02	81,82
May-15	66,23	3	31,72	6,07	21,45	5,08	80,86
Jun-15	62,8	2,9	31,08	6,4	20,79	5,24	79,87
Jul-15	62,5	2,69	30,73	6,51	20,60	5,25	79,69
Ago-15	67,53	2,92	30,9	6,46	21,20	5,35	79,85
Sept-15	70,29	5,45	30,36	6,59	21,20	6,25	77,24
Oct-15	66,03	6,08	30,37	6,97	20,80	6,69	75,67
Nov-15	62,49	6,65	30,04	7,15	20,29	6,99	74,38
Dic-15	61,69	6,92	29,22	7,13	19,83	7,06	73,74
Ene-16	61,14	7,64	28,74	7,14	19,55	7,30	72,81
Feb-16	59,26	7,38	28,53	7,02	19,26	7,14	72,96
Mar-16	57,63	6,72	28,18	6,98	18,93	6,89	73,30

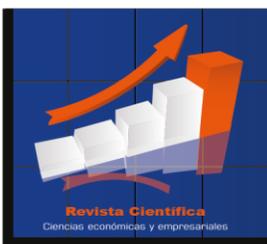
Fuente: Autor

El análisis de estas curvas permite analizar el comportamiento de cada aspecto de la gestión de mantenimiento en la flota, véase el gráfico 5.

Gráfico 5. Evolución histórica de los indicadores CMD.



Fuente: Autor



Discusión

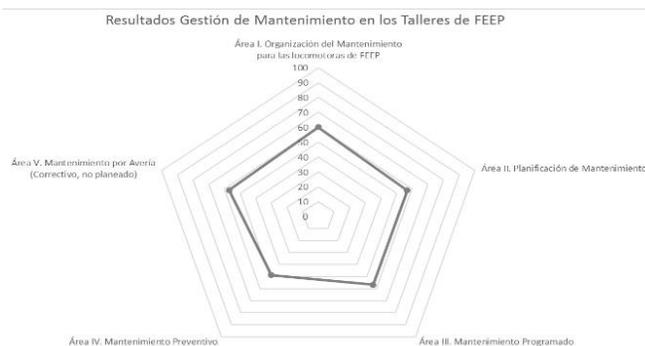
Para comprobar la hipótesis “El estado actual de la Gestión de Mantenimiento aplicada en las locomotoras tipo BBB 2400 incide en la disponibilidad de las locomotoras tipo BBB 2400 de FEFP”, se relacionará los resultados de las variables estudiadas, la variable dependiente que corresponde a la “Disponibilidad de las locomotoras tipo BBB 2400 de FEFP la cual fue evaluada estadísticamente, dio como resultado una disponibilidad del 73,30% la cual es considerada como baja.

La variable independiente “Estado actual de la Gestión de Mantenimiento aplicada a las locomotoras tipo BBB 2400”, evaluada en 5 áreas a través de encuestas de evaluación por personal de mantenimiento pertinente, dio como resultado un valor del 55,78% de 100% alcanzable y fue considerado como regular de acuerdo a la escala asumida en la tabla 1.

Al comparar los resultados de ambas variables se puede comprobar la hipótesis de que la gestión de mantenimiento aplicada a las locomotoras ha influido en la disponibilidad de las locomotoras de FEFP durante el período analizado ya que ambas evaluaciones alcanzaron bajos resultados.

Un hecho que respalda esta aseveración es que las áreas que consiguieron el menor porcentaje de calificación fueron las áreas de mantenimiento programado y mantenimiento preventivo, aspecto que se puede observar en el diagrama radar realizado a partir de la auditoría (Gráfico 6) y que se puede contrastar con el hecho de que al analizar los indicadores CMD indican que el principal problema es la realización de las actividades de mantenimiento preventivo las cuales no logran controlar adecuadamente las fallas de las locomotoras.

Gráfico 6. Diagrama radar de la evaluación de la gestión de mantenimiento.



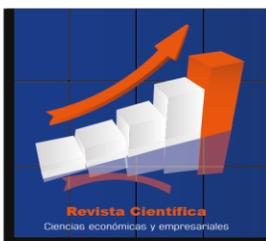
Fuente: Autor

Específicamente el análisis CMD refiere que el modelo de mantenimiento aplicado durante el período de tiempo estudiado provoca el comportamiento de los indicadores CMD de la siguiente manera. La interpretación del gráfico 5 muestra que el indicador MTBMc, este inicia con un valor de 87,298 h y termina con una baja hasta los 57,63h, lo cual es perjudicial en las aspiraciones de los objetivos de mantenimiento ya que para aumentar la disponibilidad esta debería incrementarse en el tiempo o por lo menos mantenerse constante. En cuanto al MTBMp, este comienza en 33,62 h y desciende paulatinamente hasta 28,28 h, si bien es cierto el descenso no es muy pronunciado en el tiempo y se puede apreciar una curva sin fluctuaciones y casi constante; esto es lo que confirma la premisa de que los mantenimientos planeados se cumplen de acuerdo al tiempo establecido pero que sin embargo al compararla con la curva de mantenimientos correctivos se demuestra que estas actividades planeadas no están controlando eficazmente las fallas.

En cuanto a la mantenibilidad, la gráfica para el análisis se construye con los resultados de los indicadores MTTR, M_p y \overline{M} , estos indicadores son directamente influidos por el modelo de gestión de mantenimiento. Las gráficas indican que el MTTR con 6,72 h y M_p de 6,66 h son valores muy altos lo cual no es adecuado ya que son horas perdidas en la producción de la empresa; el indicador \overline{M} presenta el mismo comportamiento ya que está en función de los dos anteriores.

Para asegurar que la producción de una empresa no sea afectada por los problemas técnicos de sus activos, que en este caso es la flota de locomotoras de la empresa de ferrocarriles, esta no debe sufrir paros por cuestiones técnicas, lo ideal es asegurar altas disponibilidades que en el caso de la empresa analizada esta disponibilidad es afectada por los cuatro indicadores, mantenimientos planeados que no son capaces de controlar la ocurrencia de mantenimientos correctivos y altos valores de mantenibilidad, indicadores que son afectados directamente por el modelo de mantenimiento aplicado específicamente el área III de mantenimiento programado y el área IV de mantenimiento preventivo.

Es muy importante entonces el hecho de que luego de este estudio se demuestre además que tanto la auditoría de mantenimiento que en este caso evaluó un modelo de gestión de mantenimiento en



V áreas principales y el análisis de CMD con el cual se demostró la influencia directa de este modelo, haya podido identificar como sigue lo siguiente:

Que los problemas en la disponibilidad se dan por mantenimientos planeados ineficientes y altos valores de mantenibilidad. Una baja disponibilidad es un indicativo directo de una baja producción.

Los indicadores son afectados directamente por las áreas del modelo de gestión de mantenimiento en especial por el área III de mantenimiento programado y el área IV de mantenimiento preventivo.

El área III demuestra falencias en la planificación del mantenimiento programado, la programación e Implantación del mantenimiento programado, y el control y evaluación del mantenimiento programado.

El área IV muestra falencias en la determinación de parámetros para el mantenimiento preventivo, la planificación, programación, implantación, control y evaluación del mantenimiento preventivo.

Lo anteriormente expuesto permite hacer hincapié que ambas herramientas de análisis pueden ser muy apreciadas al momento de desear evaluar técnicamente la gestión en este caso en el área del mantenimiento de una empresa, recalando que las herramientas aquí expuestas han sido diseñadas para empresas de ferrocarriles y sus activos de flota pero que sin embargo pueden ser aplicados también al área automotriz en cualquier tipo de flota. A partir de los problemas identificados en la gestión se puede elaborar nuevos modelos de gestión de mantenimiento adecuados para la empresa en cuestión.

Conclusiones

La utilización de indicadores de mantenimiento CMD mediante el cálculo de la disponibilidad alcanzada en la flota de locomotoras de FEED, es posible debido a que en una flota de ferrocarriles de una empresa, existe la información necesaria en los registros de mantenimiento considerando que de acuerdo a la información disponible hay algunos tipos de disponibilidades de uso empresarial, dando como resultado la medida de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad alcanzada en la flota y que reflejan los logros alcanzados por la gestión de mantenimiento aplicada.

La metodología propuesta para la medición de indicadores CMD en las locomotoras de FEED, demostró ser adecuada para elegir el tipo de disponibilidad a calcular usando además el análisis de weibull y análisis estadístico para determinar la evolución mensual de los indicadores durante el período de estudio.

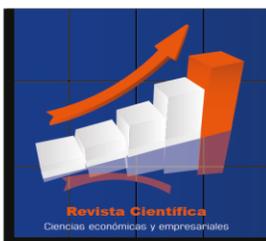
El estudio realizado para evaluar el estado actual de la gestión de mantenimiento aplicado en las locomotoras diésel eléctricas de FEED, determinó que su estado es regular y en consecuencia se alcanzaron niveles bajos en los indicadores CMD, con un índice de confiabilidad correctiva de 29,68%, confiabilidad preventiva de 39,77%, mantenibilidad debida a correctivos de 85,79%, mantenibilidad debida a preventivos de 68,80% y una disponibilidad alcanzada de 73,30%.

Los indicadores de confiabilidad MTBMc de 57,63 h, MTBMp de 28,18 h y los resultados de la evaluación del estado actual de la gestión de mantenimiento en los que se indica que las áreas más deficientes de la gestión son el área III de mantenimiento programado y IV de mantenimiento preventivo, demostraron que las acciones preventivas de mantenimiento adoptadas, son las que no están logrando controlar las fallas que provocan los bajos niveles de confiabilidad.

Una disponibilidad baja es indicativa de una pérdida de producción ya que cada vez que la flota no está disponible la empresa no produce. La disponibilidad está afectada por la confiabilidad y mantenibilidad. Confiabilidades bajas y mantenibilidades altas afectan la disponibilidad negativamente. Los indicadores de CMD son resultado de la gestión de mantenimiento que la empresa este aplicando a sus activos.

La metodología planteada para la medición de los indicadores en el estudio, es aplicable para la evaluación mensual CMD en empresas de ferrocarriles que deseen aplicar esta herramienta.

Los problemas identificados por medio de las herramientas planteadas permitirán mejorar los modelos de mantenimiento o a su vez elaborar nuevas propuestas orientadas a resolver los problemas de estas empresas.



Referencias

1. Acevedo N., M., Agüero L., M., Aranguren R., J., Bravo S., J., Gómez de la Vega M., H., Gómez M., B., . . . Yañez M., M. (2007). *Confiabilidad Integral Sinergia de Disciplinas*. Maracaibo, Venezuela.
2. AENOR. (2011). Norma UNE-EN 13306:2011. Mantenimiento. Terminología del mantenimiento. Obtenido de <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0046894>
3. FEEP. (2015). *Historia del Ferrocarril*. Recuperado de: <http://trenecuador.com/ferrocarrilesdelecuador/historia/>
4. López, E. R. (2012). *Estudio de mejora del mantenimiento mediante la aplicación de la distribución de Weibull a un histórico de fallos*. Recuperado de: <http://es.slideshare.net/EduardoRL2/pfpg>.
5. Márquez, M. (2010). *Manual de la Ingeniería de la Calidad. Módulo III Gestión de Mantenimiento*. Caracas, Venezuela.
6. Mora Gutiérrez, L. A. (2009). *Mantenimiento. Planeación, ejecución y control*. Colombia: Alfaomega.
7. Minitab. (2015). Método de estimación de mínimos cuadrados y método de estimación de máxima verosimilitud. Obtenido de <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/reliability/parameter-estimates/least-squares-and-maximum-likelihood-estimation-methods/>
8. Parra Márquez, C. A., & Crespo Márquez, A. (2012). *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos*. Sevilla, España: Ingeman.
9. Torres, L. D. (2010). *Mantenimiento. Su implementación y gestión* (Tercera ed.). Argentina: Universitas.

References

1. Acevedo N., M., Agüero L., M., Aranguren R., J., Bravo S., J., Gómez de la Vega M., H., Gómez M., B., . . . Yañez M., M. (2007). *Integral Reliability Synergy of Disciplines*. Maracaibo Venezuela.

2. AENOR (2011). Standard UNE-EN 13306: 2011. Maintenance. Maintenance terminology Retrieved from <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0046894>
3. FEED (2015). Railroad History Recovered from: <http://trenecuador.com/ferrocarrilesdelecuador/historia/>
4. López, E. R. (2012). Maintenance improvement study by applying the Weibull distribution to a fault history. Recovered from: <http://es.slideshare.net/EduardoRL2/pfpg>.
5. Márquez, M. (2010). Quality Engineering Manual. Module III Maintenance Management. Caracas Venezuela.
6. Mora Gutiérrez, L. A. (2009). Maintenance. Planning, execution and control. Colombia: Alfaomega.
7. Minitab (2015). Minimum square estimation method and maximum likelihood estimation method. Retrieved from <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/reliability/parameter-estimates/least-squares-and-maximum-likelihood-estimation-methods/>
8. Parra Márquez, C. A., & Crespo Márquez, A. (2012). Maintenance Engineering and Applied Reliability in Asset Management. Seville, Spain: Ingeman.
9. Torres, L. D. (2010). Maintenance. Its implementation and management (Third ed.). Argentina: Universitas.

©2019 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).