



## **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

### **“PLAN DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO BASADO EN EL ANÁLISIS DE ÍNDICES DE CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y DISPONIBILIDAD DE LAS LOCOMOTORAS TIPO BBB 2400 DE FERROCARRILES DEL ECUADOR EMPRESA PÚBLICA”**

**AUTOR: LUIS FERNANDO BUENAÑO MOYANO**

**Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo,  
presentado ante el Instituto de Postgrado y Educación Continua de la  
ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de Magíster  
en Gestión del Mantenimiento Industrial.**

**RIOBAMBA – ECUADOR  
AGOSTO 2016**



## **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO CERTIFICACIÓN:**

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, titulado "PLAN DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO BASADO EN EL ANÁLISIS DE ÍNDICES DE CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y DISPONIBILIDAD DE LAS LOCOMOTORAS TIPO BBB 2400 DE FERROCARRILES DEL ECUADOR EMPRESA PÚBLICA", de responsabilidad del Ing. Luis Fernando Buenaño Moyano ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal:

\_\_\_\_\_  
Ing. Oswaldo Martínez G; M.Sc.

**PRESIDENTE**

\_\_\_\_\_  
FIRMA

\_\_\_\_\_  
Ing. Raúl Cabrera F; M.Sc.

**DIRECTOR**

\_\_\_\_\_  
FIRMA

\_\_\_\_\_  
Ing. Carlos Santillán M; M.Sc.

**MIEMBRO**

\_\_\_\_\_  
FIRMA

\_\_\_\_\_  
Ing. Wilson Villagrán C; M.Sc.

**MIEMBRO**

\_\_\_\_\_  
FIRMA

Riobamba, Agosto de 2016

## **DERECHOS INTELECTUALES**

Yo, Luis Fernando Buenaño Moyano, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

FIRMA  
0603344680

## **DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD**

Yo, Luis Fernando Buenaño Moyano, declaro que el presente **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor/a, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este proyecto de investigación de maestría.

Riobamba, 31 de julio de 2016

---

Luis Fernando Buenaño Moyano  
FIRMA  
0603344680

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a Dios y a mis padres, Luis Medardo Buenaño Silva y Amada Sulema Moyano Arboleda. A Dios porque ha estado conmigo a cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar, a mis padres, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento, depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento de mi inteligencia y capacidad.

Luis.

## **AGRADECIMIENTO**

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la IPEC, por brindarme la oportunidad de aumentar mis conocimientos en bien de la sociedad.

A Ferrocarriles del Ecuador Empresa Pública, a todos los integrantes del área de mantenimiento en especial a la filial de Riobamba, por permitir y apoyar la realización del presente trabajo.

A mi grupo tutor y asesor, quienes sin escatimar esfuerzo alguno compartieron su tiempo y conocimiento durante el desarrollo del proyecto.

Y en especial para todos los amigos, compañeros y personas que me apoyaron de una u otra manera para culminar con éxito una etapa de mi vida.

Luis.

## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS .....	vi
LISTA DE GRÁFICOS .....	vii
SIMBOLOGÍA.....	ix
LISTA DE ANEXOS.....	x
LISTA DE ECUACIONES.....	xi
RESUMEN .....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Problema de investigación.....</b>	<b>1</b>
<i>1.1.1 Planteamiento del problema .....</i>	<i>1</i>
<i>1.1.2 Formulación del problema .....</i>	<i>3</i>
<i>1.1.3 Sistematización del problema.....</i>	<i>3</i>
<i>1.1.4 Justificación de la investigación.....</i>	<i>4</i>
<b>1.2 Objetivos de la investigación.....</b>	<b>5</b>
<i>1.2.1 Objetivo general.....</i>	<i>5</i>
<i>1.2.2 Objetivos específicos .....</i>	<i>5</i>
<b>1.3 Hipótesis .....</b>	<b>5</b>
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>6</b>
<b>2. MARCO DE REFERENCIA .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Antecedentes y estudios previos .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2 Locomotora diésel eléctrica tipo BBB 2400.....</b>	<b>9</b>
<i>2.2.1 Generalidades.....</i>	<i>9</i>
<i>2.2.2 Características principales de la locomotora.....</i>	<i>10</i>
<i>2.2.2.1 Características mecánicas .....</i>	<i>10</i>
<i>2.2.2.2 Características de tracción.....</i>	<i>11</i>

2.2.2.3	<i>Prestaciones de la locomotora</i> .....	11
2.2.3	<b><i>Elementos principales que constituyen la locomotora</i></b> .....	12
2.2.3.1	<i>La caja</i> .....	12
2.2.4	<b><i>Sistemas principales de la locomotora</i></b> .....	15
2.2.4.1	<i>Sistema térmico</i> .....	16
2.2.4.2	<i>Sistema neumático</i> .....	18
2.2.4.3	<i>Sistema mecánico</i> .....	20
2.2.4.4	<i>Sistema eléctrico</i> .....	23
2.3	<b>Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad, y Mantenibilidad</b> .....	26
2.3.1	<b><i>Confiabilidad</i></b> .....	28
2.3.2	<b><i>Mantenibilidad</i></b> .....	30
2.3.3	<b><i>Disponibilidad</i></b> .....	31
2.3.4	<b><i>Diferentes disponibilidades de mayor uso empresarial</i></b> .....	32
2.4	<b>Mejoras en la confiabilidad, mantenibilidad, y disponibilidad</b> .....	35
2.5	<b>Métodos de predicción CMD</b> .....	36
2.5.1	<b><i>Métodos de cálculo puntuales (o promedios)</i></b> .....	36
2.5.2	<b><i>Métodos de distribuciones</i></b> .....	36
2.5.3	<b><i>Métodos de modelos hpp o nhpp</i></b> .....	37
2.5.4	<b><i>Series temporales</i></b> .....	37
2.5.5	<b><i>Otros</i></b> .....	37
2.6	<b>Distribuciones estadísticas aplicadas al mantenimiento</b> .....	37
2.6.1	<b><i>Distribución normal o de gauss</i></b> .....	37
2.6.2	<b><i>Distribución lognormal</i></b> .....	38
2.6.3	<b><i>Distribución loglogística</i></b> .....	40
2.6.4	<b><i>Distribución exponencial</i></b> .....	42
2.6.5	<b><i>Distribución de weibull</i></b> .....	43
2.6.5.1	<b><i>Expresiones matemáticas de la distribución de Weibull</i></b> .....	43
2.6.5.2	<b><i>Características de la distribución de Weibull</i></b> .....	45
2.7	<b>Curva de la bañera o de davies</b> .....	46



<b>2.8</b>	<b>Gestión del mantenimiento.....</b>	<b>48</b>
<b>2.8.1</b>	<b><i>Etapas de la gestión de mantenimiento</i> .....</b>	<b>49</b>
2.8.1.1	<i>Planificación.....</i>	49
2.8.1.2	<i>Programación.....</i>	50
2.8.1.3	<i>Ejecución .....</i>	50
2.8.1.4	<i>Supervisión y control .....</i>	51
	<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>52</b>
<b>3.</b>	<b>DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>52</b>
<b>3.1</b>	<b>Metodología .....</b>	<b>52</b>
3.1.1	<i>Tipo de estudio .....</i>	52
3.1.2	<i>Diseño de la investigación .....</i>	52
3.1.3	<i>Métodos, instrumentos y técnicas .....</i>	53
3.1.3.1	<i>Método inductivo .....</i>	54
3.1.3.2	<i>Método analítico.....</i>	54
3.1.3.3	<i>Método correlacional.....</i>	54
3.1.3.4	<i>Valoración del estado actual de la gestión de mantenimiento aplicada en los talleres de las filiales de FEED .....</i>	54
3.1.3.5	<i>Metodología para la medición de CMD.....</i>	55
3.1.3.6	<i>Técnicas.....</i>	58
3.1.3.7	<i>Instrumentos .....</i>	58
<b>3.2</b>	<b>Delimitación.....</b>	<b>59</b>
<b>3.3</b>	<b>Población .....</b>	<b>59</b>
<b>3.4</b>	<b>Cronograma .....</b>	<b>59</b>
	<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>61</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>61</b>
<b>4.1</b>	<b>Obtención de resultados .....</b>	<b>61</b>
4.1.1	<i>Hipótesis general.....</i>	61
4.1.2	<i>Operacionalización de variables .....</i>	61
4.1.2.1	<i>Operacionalización conceptual .....</i>	61

4.1.2.2	<i>Operacionalización metodológica de variables</i> .....	61
4.1.3	<b>Comprobación de la hipótesis de investigación</b> .....	62
4.1.3.1	<i>Determinación de variables</i> .....	62
4.1.4	<b>Determinación de la población</b> .....	63
4.1.5	<b>Recolección de datos</b> .....	64
4.1.6	<b>Medición y análisis cmd en las locomotoras</b> .....	64
4.1.7	<b>Análisis CMD</b> .....	77
4.1.8	<b>Determinación estado actual de la gestión de mantenimiento aplicada en las locomotoras</b> .....	91
4.1.8.1	<i>Información adicional</i> .....	93
4.1.9	<b>Comprobación de la hipótesis</b> .....	97
<b>CAPÍTULO V</b> .....		<b>98</b>
5.	<b>PROPUESTA</b> .....	<b>98</b>
5.1	<b>Título de la propuesta</b> .....	<b>98</b>
5.2	<b>Objetivos</b> .....	<b>98</b>
5.2.1	<i>Objetivo general</i> .....	98
5.2.2	<i>Objetivos específicos</i> .....	98
5.3	<b>Justificación</b> .....	<b>98</b>
5.4	<b>Importancia</b> .....	<b>99</b>
5.5	<b>Alcance</b> .....	<b>99</b>
5.6	<b>Fundamentación teórica</b> .....	<b>100</b>
5.6.1	<i>Análisis de Pareto</i> .....	100
5.6.2	<i>Análisis de modos de fallas, efectos y criticidad (FMECA)</i> . .....	100
5.6.3	<i>Indicadores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad</i> .....	101
5.7	<b>Descripción de la propuesta</b> .....	<b>101</b>
5.7.1	<b>Área I: organización del mantenimiento para las locomotoras de FEED</b> .....	<b>102</b>
5.7.1.1	<i>Creación y organización del departamento de mantenimiento</i> .....	102
5.7.1.2	<i>Funciones y responsabilidades de la función de mantenimiento</i> .....	102
5.7.2	<b>Área II: planificación del mantenimiento</b> .....	<b>105</b>

5.7.2.1	<i>Objetivos de la planificación</i> .....	105
5.7.2.2	<i>Políticas para la planificación</i> .....	105
<b>5.7.3</b>	<b>Área III. Mantenimiento programado</b> .....	<b>106</b>
5.7.3.1	<i>Procedimiento para el mantenimiento rutinario</i> .....	107
5.7.3.2	<i>Consideraciones para la aplicación del mantenimiento rutinario</i> .....	109
5.7.3.3	<i>Procedimiento para la planificación, programación y ejecución del mantenimiento programado</i> .....	109
5.7.3.4	<i>Consideraciones para la aplicación del mantenimiento preventivo programado</i> ....	112
<b>5.7.4</b>	<b>Área IV. Mantenimiento preventivo</b> .....	<b>112</b>
5.7.4.1	<i>Procedimiento para la aplicación de mejoras de mantenimiento preventivo</i> .....	113
5.7.4.2	<i>Consideraciones para la aplicación del procedimiento</i> .....	114
<b>5.7.5</b>	<b>Área V. Mantenimiento por avería (correctivo)</b> .....	<b>116</b>
5.7.5.1	<i>Procedimiento para la planificación, programación, ejecución y control del mantenimiento correctivo para las locomotoras</i> .....	117
<b>5.7.6</b>	<b>Mejoras sugeridas a los planes de mantenimiento para mejorar confiabilidad y mantenibilidad</b> .....	<b>120</b>
5.7.6.1	<i>Mejoras en la confiabilidad</i> .....	120
5.7.6.2	<i>Mejoras en la mantenibilidad</i> .....	139
<b>5.7.7</b>	<b>Control y supervisión de las acciones de mantenimiento</b> .....	<b>144</b>
<b>5.8</b>	<b>Evaluación</b> .....	<b>144</b>
<b>5.8.1</b>	<b>Sistema de indicadores CMD</b> .....	<b>144</b>
<b>5.9</b>	<b>Impacto</b> .....	<b>146</b>
<b>5.9.1</b>	<b>Aspectos positivos</b> .....	<b>146</b>
<b>5.9.2</b>	<b>Aspectos negativos</b> .....	<b>147</b>
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>148</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>150</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>151</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>154</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1-2:</b> Características mecánicas de la locomotora. ....	11
<b>Tabla 2-2:</b> Características de tracción de la locomotora. ....	11
<b>Tabla 3-2:</b> Prestaciones de la locomotora.....	12
<b>Tabla 4-2:</b> Elementos principales de la locomotora.....	12
<b>Tabla 5-2:</b> Elementos de las cabinas de conducción.....	15
<b>Tabla 1-3:</b> Cronograma de actividades para la ejecución de la investigación. ....	60
<b>Tabla 1-4:</b> Operacionalización conceptual de variables. ....	61
<b>Tabla 2-4:</b> Operacionalización metodológica de variables. ....	61
<b>Tabla 3-4:</b> Distribución de las locomotoras diésel eléctricas en las filiales de FEED .....	63
<b>Tabla 4-4:</b> TBMc y TTR obtenidos del tratamiento de datos de los registros de mantenimiento. ....	65
<b>Tabla 5-4:</b> TBMp y Tmp obtenidos del tratamiento de datos de los registros de mantenimiento. ....	66
<b>Tabla 6-4:</b> Resultados del cálculo de MTBMc.....	73
<b>Tabla 7-4:</b> Resultados del cálculo de MTTR.....	74
<b>Tabla 8-4:</b> Resultados del cálculo de MTB Mp.....	75
<b>Tabla 9-4:</b> Resultados del cálculo de Mp. ....	76
<b>Tabla 10-4:</b> Medición de la disponibilidad alcanzada de la flota de locomotoras de FEED.....	77
<b>Tabla 11-4:</b> Codificación usada en la encuesta.....	91
<b>Tabla 12-4:</b> Resultados de la encuesta para la evaluación de la Gestión de Mantenimiento.....	92
<b>Tabla 1-5:</b> Número total de fallas de locomotoras por sistema.....	121
<b>Tabla 2-5:</b> Modos y Efectos de Fallas del sistema eléctrico. ....	123
<b>Tabla 3-5:</b> Modos y Efectos de Fallas del sistema Neumático. ....	128
<b>Tabla 4-5:</b> Criticidad de los modos de falla del sistema eléctrico.....	131
<b>Tabla 5-5:</b> Criticidad de fallas del sistema neumático. ....	136
<b>Tabla 6-5:</b> Acciones de mantenimiento sugeridas para los planes de mantenimiento preventivo del sistema eléctrico. ....	140
<b>Tabla 7-5:</b> Acciones de mantenimiento sugeridas para los planes de mantenimiento del sistema neumático.....	143
<b>Tabla 8-5:</b> Cuadro de indicadores propuestos para el plan de Gestión de Mantenimiento.....	145

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Figura 1-2.</b> Evolución del MKBF (Kms).....	8
<b>Figura 2-2.</b> Evolución de la Disponibilidad.....	8
<b>Figura 3-2.</b> Evolución del tiempo medio de restauración .....	8
<b>Figura 4-2.</b> Locomotora tipo BBB 2400.....	10
<b>Figura 5-2.</b> Elementos principales que constituyen la locomotora. ....	13
<b>Figura 6-2.</b> Cabinas de conducción. ....	14
<b>Figura 7-2.</b> Principio de producción de aire. ....	19
<b>Figura 8-2.</b> Suspensión de la locomotora. ....	21
<b>Figura 9-2.</b> Circuito de potencia de la locomotora. ....	23
<b>Figura 10-2.</b> Arranque del motor diésel.....	24
<b>Figura 11-2.</b> Representación de los estados TBF y TTR. ....	29
<b>Figura 12-2.</b> Distribución normal con $\mu=0$ y $\sigma=0$ .....	38
<b>Figura 13-2.</b> Razones de fallo de distribuciones lognormales .....	39
<b>Figura 14-2.</b> Distribución Lognormal con distintos parámetros $\sigma$ . ....	40
<b>Figura 15-2.</b> Función de distribución de probabilidad loglogística. ....	41
<b>Figura 16-2.</b> Función de riesgo de una distribución loglogística. ....	42
<b>Figura 17-2.</b> Distribución exponencial para distintos valores de $\theta$ . ....	42
<b>Figura 18-2.</b> Distribución de Weibull para distintos valores de $\beta$ .....	44
<b>Figura 19-2.</b> Tasa de fallo en la distribución de weibull.....	45
<b>Figura 20-2.</b> Curva de la bañera o de Davies.....	48
<b>Figura 1-3.</b> Metodología utilizada para la medición CMD de las locomotoras de FEED.....	57
<b>Figura 1-4.</b> Estructura organizacional de FEED.....	63
<b>Figura 2-4.</b> StatAdisor rechazando el ajuste de los datos de $M_p$ a la distribución de weibull. ....	69
<b>Figura 3-4.</b> StatAdisor en el que se acepta el ajuste de los datos de $M_p$ a la distribución loglogística en lugar de la weibull o lognormal. ....	70
<b>Figura 4-4.</b> Función de confiabilidad influenciada por mantenimientos correctivos del análisis integral de la flota. ....	78
<b>Figura 5-4.</b> Distribución acumulada de fallas influenciada por los mantenimientos correctivos del análisis integral de la flota. ....	78
<b>Figura 6-4.</b> Función de densidad influenciada por los mantenimientos correctivos del análisis integral de la flota. ....	79

<b>Figura 7-4.</b> Función de riesgo de la confiabilidad influenciada por mantenimiento correctivo. ....	79
<b>Figura 8-4.</b> Función de Confiabilidad en mantenimientos planeados. ....	80
<b>Figura 9-4.</b> Función de distribución acumulada en mantenimientos planeados. ....	80
<b>Figura 10-4.</b> Función de densidad en los mantenimientos planeados .....	81
<b>Figura 11-4.</b> Función de riesgo en los mantenimientos planeados .....	82
<b>Figura 12-4.</b> Función de mantenibilidad en las acciones no planeadas. ....	82
<b>Figura 13-4.</b> Función de densidad de los TR en las acciones no planeadas. ....	83
<b>Figura 14-4.</b> Función de tasa de reparación en las acciones no planeadas. ....	84
<b>Figura 15-4.</b> Función de mantenibilidad en las acciones planeadas. ....	84
<b>Figura 16-4.</b> Función de densidad en las acciones planeadas. ....	85
<b>Figura 17-4.</b> Función de tasa de reparación en las acciones planeadas. ....	85
<b>Figura 18-4.</b> Gráfica para el análisis histórico de los indicadores de confiabilidad. ....	86
<b>Figura 19-4.</b> Gráfica para el análisis histórico de la mantenibilidad.....	88
<b>Figura 20-4.</b> Gráfica para el análisis integral de Beta.....	89
<b>Figura 21-4.</b> Gráfica para el análisis histórico de la Disponibilidad.....	90
<b>Figura 22-4.</b> Diagrama radar de la Evaluación de la Gestión de Mantenimiento.....	92
<b>Figura 23-4.</b> Resultados pregunta 80 de la encuesta. ....	93
<b>Figura 24-4.</b> Resultados pregunta 81 de la encuesta. ....	93
<b>Figura 25-4.</b> Resultados de la pregunta 82 de la encuesta. ....	94
<b>Figura 26-4.</b> Respuestas pregunta 83 de la encuesta.....	94
<b>Figura 27-4.</b> Resultados de la pregunta 84 de la encuesta. ....	95
<b>Figura 28-4.</b> Respuestas de la pregunta 86 de la encuesta. ....	95
<b>Figura 29-4.</b> Respuestas de la pregunta 87 de la encuesta. ....	96
<b>Figura 30-4.</b> Respuestas a la pregunta 88 de la encuesta. ....	96
<b>Figura 1-5.</b> Organigrama de la función de mantenimiento de las locomotoras.....	103
<b>Figura 2-5.</b> Proceso de mantenimiento rutinario y detección de fallas en las locomotoras.....	108
<b>Figura 3-5.</b> Proceso de mantenimiento programado para las locomotoras de FEED.....	111
<b>Figura 4-5.</b> Procedimiento para la aplicación de mejoras en el mantenimiento preventivo ....	115
<b>Figura 5-5.</b> Procedimiento para la gestión del mantenimiento correctivo de las locomotoras. ....	118
<b>Figura 6-5.</b> Análisis de Pareto de los sistemas de las locomotoras. ....	121

## SIMBOLOGÍA

$D_G$	Disponibilidad genérica
$D_A$	Disponibilidad alcanzada
$D_I$	Disponibilidad inherente o intrínseca
$D_O$	Disponibilidad operacional
$D_{OG}$	Disponibilidad operacional generalizada
MTBM	Tiempo medio entre mantenimientos (Mean Time Between Maintenance)
MTBM <sub>c</sub>	Tiempo medio entre mantenimientos no planeados o correctivos
TBM <sub>c</sub>	Tiempo entre mantenimientos no planeados o correctivos
MTBM <sub>p</sub>	Tiempo medio entre mantenimientos planeados o preventivos
TBM <sub>p</sub>	Tiempo entre mantenimientos planeados o preventivos
$\overline{M}$	Tiempo medio de mantenimiento activo
MTTR	Tiempo neto medio para realizar reparaciones o mantenimientos correctivos (Mean Time To Repair)
TTR	Tiempo para reparar o realizar mantenimientos correctivos
M <sub>p</sub>	Tiempo neto medio para ejecutar tareas proactivas de mantenimientos planeados.
T <sub>Mp</sub>	Tiempo para realizar tareas de mantenimiento preventivo o tareas proactivas

## **LISTA DE ANEXOS**

- A:** Preguntas de la encuesta
- B:** Criterios para la evaluación de la criticidad de los modos de falla.
- C:** Matriz de Criticidad
- D:** Formato de documentación para mantenimiento
- E:** Componentes varios de la locomotora



## LISTA DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1</b>	MTBF.....	29
<b>Ecuación 2</b>	Función fiabilidad.....	40
<b>Ecuación 3</b>	Distribución acumulada.....	29
<b>Ecuación 4</b>	Función de densidad.....	30
<b>Ecuación 5</b>	Tasa de fallas.....	30
<b>Ecuación 6</b>	Mantenibilidad.....	30
<b>Ecuación 7</b>	Tasa de reparaciones.....	31
<b>Ecuación 8</b>	Disponibilidad.....	31
<b>Ecuación 9</b>	Disponibilidad genérica.....	32
<b>Ecuación 10</b>	Disponibilidad genérica con mantenimientos preventivos.....	32
<b>Ecuación 11</b>	Disponibilidad inherente.....	33
<b>Ecuación 12</b>	Disponibilidad alcanzada.....	33
<b>Ecuación 13</b>	Distribución lognormal.....	38
<b>Ecuación 14</b>	Función densidad de probabilidad lognormal.....	39
<b>Ecuación 15</b>	Función de distribución acumulada lognormal.....	39
<b>Ecuación 16</b>	Función de fiabilidad en lognormal.....	39
<b>Ecuación 17</b>	Función de distribución acumulada en distribución loglogística.....	40
<b>Ecuación 18</b>	Función de densidad de probabilidad en distribución loglogística.....	41
<b>Ecuación 19</b>	Función de supervivencia en distribución loglogística.....	41
<b>Ecuación 20</b>	Función de riesgo en distribución loglogística.....	41
<b>Ecuación 21</b>	Función de densidad de probabilidad en weibull.....	44

<b>Ecuación 22</b>	Función de distribución acumulada en weibull.....	44
<b>Ecuación 23</b>	Fiabilidad en weibull.....	45
<b>Ecuación 24</b>	MTBF en weibull.....	45
<b>Ecuación 25</b>	Tasa de fallo en weibull.....	45
<b>Ecuación 26</b>	Distancia $D^+$ .....	68
<b>Ecuación 27</b>	Distancia $D^-$ .....	68
<b>Ecuación 28</b>	Estadística Kolmogorov.....	69
<b>Ecuación 29</b>	Anderson-Darling $A^2$ .....	69
<b>Ecuación 30</b>	Cálculo NPR.....	130

## RESUMEN

Se desarrolló un plan de Gestión de Mantenimiento basado en el análisis de índices de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de las locomotoras diésel eléctricas tipo BBB 2400 de Ferrocarriles del Ecuador Empresa Pública (FEEP). Se analizaron dos variables: Estado actual de la Gestión de Mantenimiento, a través de una encuesta para determinar el estado actual, la cual se aplicó a siete miembros de la organización entre jefes de taller y responsables de locomotoras en las 4 filiales de FEEP. Para la segunda variable Disponibilidad de las locomotoras tipo BBB 2400 de FEEP, se utilizó una metodología para la medición de indicadores confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD) mediante análisis con software estadístico en ocho locomotoras de la empresa. Como resultados se obtuvo que la Gestión de Mantenimiento alcanzó un estado de regular con un global de 55,78% de 100% obtenible. Mediante el análisis CMD se determinó índices bajos 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%. Al comparar los resultados se comprobó la hipótesis de que el estado actual de la gestión de mantenimiento incide en el resultado de los indicadores CMD, por lo que se planteó un plan de gestión de mantenimiento que incremente los niveles de los indicadores CMD mediante estrategias y procedimientos de mejora para las áreas de gestión afectadas. Al usar el análisis de Pareto y FMECA se detectó altas criticidades en modos de falla en los sistemas eléctrico y neumático para los cuales se propuso nuevas tareas y modificaciones de frecuencias en los planes de mantenimiento. Se recomienda realizar una capacitación al personal de mantenimiento, referente a la propuesta planteada, antes de realizar su implantación para que esta tenga éxito.

**Palabras clave:** <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO>, <CONFIABILIDAD>, <MANTENIBILIDAD>, <DISPONIBILIDAD>, <ESTUDIO CMD>, <PLAN DE MANTENIMIENTO>, <LOCOMOTORAS DIÉSEL-ELÉCTRICAS>, <EMPRESA DE FERROCARRILES (FEEP)>

## ABSTRACT

A management plan of Maintenance was developed. It was based on the analysis of indices of reliability, maintainability, and availability of electric diesel locomotives type BBB 2400 of Ferrocarriles Ecuador Empresa Pública (FEEP). Two variables were analyzed: current state of the Maintenance Management, through a survey to determine the current state. This survey was applied to seven members of this organization, among different people like workshop managers and people who is responsible of the locomotives in the 4 subsidiary companies of the FEEP. The second variable was Availability of the locomotives type BBB 2400 of the FEEP. A specific methodology was used to measure the indicators of reliability, availability and maintainability (CMD) throughout the analysis of the statistics software on eight locomotives of the enterprise. The result gotten was that the Maintenance Management reached a regular state with a global of 55,78 % from the 100% achieved. Through the analysis CMD, it was determined low indices of corrective reliability of 29,68%, preventive reliability of 39,77%, corrective maintenance of 85,79%, preventive maintenance of 68,80% and an achieved availability of 73,30%. When comparing the results, the hypothesis about the current state of the maintenance management influences on the result of the indicators CMD. Therefore, it was proposed a plan of maintenance management that increases the levels of the indicators CMD through strategies and procedures of improvement for the management areas affected. When using the Pareto and FMECA, it was detected high criticalities on fault modes in the electronic and pneumatic systems. Hence, it was proposed new tasks and modifications of frequency on the maintenance plans. It was proposed new tasks and modifications of frequency on the maintenance plans. It is suggested to organize a workshop for the personnel who works on the maintenance area, in referring to the proposal made, before working on the establishment so it succeeds.

**Keywords:** <TECHNOLOGY AND SCIENCE OF THE ENGINEERING>, <MAINTENANCE OF ENGINEERING>, <MAINTAINABILITY>, <RELIABILITY>, <AVAILABILITY>, <STUDY OF CMD>, <PLAN OF MAINTENANCE>, <ELECTRIC-DIESEL LOCOMOTIVES>, < “EMPRESA DE FERROCARRILES” (FEEP) >.

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUCCIÓN

#### 1.1 Problema de investigación

##### *1.1.1 Planteamiento del problema*

La construcción del ferrocarril del Ecuador constituye un símbolo de unidad nacional que ayudó al progreso del país. El mentalizador de la obra fue el presidente Gabriel García Moreno, quien, en 1873, a través de su gestión puso al servicio del Ecuador 41 Km. de vía, desde Yaguachi hasta Milagro, en la Costa. (FEEP, 2015)

García Moreno logró emplazar 95 kilómetros de vía desde Durán hasta Bucay, en la costa ecuatoriana. Luego de su muerte, el gobierno liberal del general Eloy Alfaro, de inicios del siglo XX, retomó la obra y delegó el análisis y estudio de un nuevo trazado que permitiese continuar con la construcción del ferrocarril al ingeniero norteamericano Sighald Muller. Después de dos años de investigación, Muller llamó al proyecto "el ferrocarril más difícil del mundo" debido a los obstáculos geográficos que debía enfrentar. (FEEP, 2015)

Tantos fueron los problemas que se presentaron que incluso el general Alfaro estuvo dispuesto a encargar el poder a su vicepresidente para supervisar el avance de la construcción; esto no sucedió puesto que la empresa cumplió con los plazos acordados en el tiempo estipulado. Un clavo de oro macizo colocado en la última riel selló la obra de infraestructura más grande del Ecuador. El tren arribó a la estación de Chimbacalle de Quito el 25 de junio de 1908 y fue recibido por la hija del presidente Alfaro, América. La obra se complementó el 25 de agosto de 1957 con el tramo Quito - San Lorenzo (373.4 Kilómetros) y constituyó un impulso modernizador para el país. (Visita Ecuador, 2015)

Luego de esto el ferrocarril tuvo un desarrollo importantísimo dentro del país y sus rutas, generando el desarrollo comercial y turístico en las localidades y estaciones por donde este operaba, sin embargo En 1975 inicia la decadencia del Ferrocarril debido a la competencia que se creó con el auge del transporte por carretera y la falta de interés de los gobiernos de turno. (FEEP, 2015)

Durante el gobierno del Dr. Rodrigo Borja en un intento por recobrar el ferrocarril ecuatoriano se realizó la adquisición de las locomotoras diésel eléctricas tipo BBB 2400 de fabricación francesa, las mismas que actualmente son en las que se basan las operaciones de FEEP en el Ecuador.

Desde 1993 hasta el 2007 el ferrocarril fue cayendo en el olvido de los gobiernos de turno, y fue afectado por fenómenos naturales que destruyeron parte de los tramos que hasta ese momento eran usados en los recorridos, generando una pérdida económica para la misma empresa de ferrocarriles y para las localidades ubicadas en las rutas que se recorrían.

Fue hasta el año 2008 que se inicia el proceso de rehabilitación del Ferrocarril Ecuatoriano como un proyecto emblemático del gobierno del Eco. Rafael Correa Delgado. Actualmente se disponen de 12 rutas turísticas y desde el 04 de junio de 2013 se inició la operación del Tren Crucero en el cual, a más de las locomotoras a vapor, las más utilizadas para cumplir las rutas turísticas son las locomotoras diésel eléctricas tipo BBB 2400 adquiridas en 1992. (FEEP, 2015)

Ferrocarriles del Ecuador Empresa Pública “FEEP”, es la encargada de administrar y operar el sistema ferroviario del país, actualmente se lo realiza en 4 filiales: norte, sur, centro y litoral, utilizándose 8 locomotoras diésel eléctricas para cubrir las 12 rutas que se ofrecen como paquetes turísticos a nivel local e internacional.

En el aspecto del mantenimiento, este se lo ha venido realizando desde el año 1992 en los talleres mecánicos de cada filial tomando como referencia los planes preventivos generados por el fabricante, sin embargo no se ha llevado un claro control de los indicadores de mantenimiento tales como la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad los cuales permitan medir la efectividad de la aplicación actual de los planes preventivos de mantenimiento, ni tampoco se puede recurrir a una toma de decisiones acertada para la optimización de los planes ni para la mejora de la disponibilidad de las locomotoras.

FEEP tiene como misión “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 y se asegure una disponibilidad que permita cumplir con calidad los servicios ofertados por la empresa, para esto es indispensable un modelo de

mantenimiento que se basen en el actual contexto operacional de las locomotoras y que se adapten mejor a las necesidades de la empresa esto es asegurar un máximo de la disponibilidad requerido por la empresa para cumplir con los servicios ofertados.

Actualmente la falta del análisis de los historiales de falla y mantenimiento de las locomotoras, no permite aplicar la ingeniería de la fiabilidad, cuya aplicación contribuiría a la optimización del modelo actual de mantenimiento, es decir la sección de mantenimiento de FEED carece de una gestión de mantenimiento que asegure la disponibilidad de las locomotoras lo que conlleva que en muchas ocasiones se incurra en la parada de las locomotoras, tendiendo en muchas ocasiones al mantenimiento correctivo y retrasando el cumplimiento de los servicios ofertados a los turistas o en el peor de los escenarios a suspenderlos afectando no solo a los intereses de la empresa sino también al desarrollo económico de las localidades que dependen del paso del ferrocarril para realizar sus actividades económicas.

### ***1.1.2 Formulación del problema***

¿Cómo afecta la carencia de un plan de gestión de mantenimiento en la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de las locomotoras tipo BBB 2400 de Ferrocarriles del Ecuador Empresa Pública?

### ***1.1.3 Sistematización del problema***

- ¿Qué aspectos se tomarán en consideración para el desarrollo del plan de gestión de mantenimiento para las locomotoras tipo BBB 2400 de Ferrocarriles del Ecuador Empresa Pública?
- ¿Cuál será la información que se analizará para determinar la medida de la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de las locomotoras tipo BBB 2400?
- ¿De qué manera se identificarán los sistemas críticos que tienen mayor influencia en el resultado de los indicadores de mantenimiento?
- ¿Cuáles serán los aspectos a mejorar en los planes de mantenimiento de las locomotoras tipo BBB 2400?

#### ***1.1.4 Justificación de la investigación***

Ferrocarriles del Ecuador Empresa Pública busca convertirse en una entidad moderna, eficiente, técnicamente operada, transparente y rentable, que promueva dentro del Sistema Ferroviario Nacional el desarrollo de las economías locales y micro regionales, bajo un enfoque turístico, que incida en la valoración y en el reconocimiento patrimonial histórico, tanto a nivel nacional como internacional. (FEEP, 2015)

El asegurar unos niveles altos de disponibilidad de las locomotoras a través de un plan de gestión de mantenimiento diseñado, tomando en cuenta el análisis de los indicadores de mantenimiento obtenidos hasta ahora por los departamentos de mantenimiento para gestionar las 8 locomotoras, permitirá cumplir con los objetivos que tiene FEEP, proponiendo una administración de mantenimiento técnica y rentable que optimice las tareas de mantenimiento y que sobre todo asegure una larga vida útil de las locomotoras y la calidad en el cumplimiento de los recorridos en las rutas ofertadas.

A nivel mundial, el sector ferroviario ha comenzado a aplicar métodos para la evaluación de la confiabilidad, la cual en sí engloba términos como la fiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, con el consiguiente objetivo de optimizar los modelos de gestión de mantenimiento aplicables en el sector, los cuales aseguren unos niveles aceptables de calidad en el mantenimiento y se incorporen además nuevas tecnologías que conlleven a un aseguramiento del cumplimiento y la eficiencia de la ejecución del mantenimiento en el sector.

La recuperación y posterior fortalecimiento del sector ferroviario en el Ecuador ha sido una de las metas propuestas por el gobierno ecuatoriano, por tal razón FEEP requiere que estas tendencias de aseguramiento de calidad en la ejecución del mantenimiento sean aplicadas a nivel local, y de esta manera contribuir a la consecución de los objetivos propuestos para el desarrollo del país.

Este trabajo buscará por lo tanto proponer una solución a la problemática existente con respecto al aseguramiento de la calidad del mantenimiento y su optimización con el consiguiente efecto en la mejora de la confiabilidad de las locomotoras a través de la sugerencia de propuestas de mejora a los planes actuales de mantenimiento y a su aplicación, asegurando en todo momento la medición de los indicadores de mantenimiento y sobre todo la contribución al cumplimiento de los objetivos de la empresa.



## **1.2 Objetivos de la investigación**

### ***1.2.1 Objetivo general***

Desarrollar un plan de gestión de mantenimiento basado en el análisis de índices de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de las locomotoras tipo BBB 2400 para Ferrocarriles del Ecuador Empresa Pública.

### ***1.2.2 Objetivos específicos***

- Realizar un estudio del arte sobre el análisis de indicadores de mantenimiento que se pueden aplicar a la industria ferroviaria.
- Desarrollar una metodología que permita obtener la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de las locomotoras tipo BBB2400 a partir de la información disponible.
- Identificar las unidades y sistemas críticos de la locomotora tipo BBB 2400 que influyan en los indicadores de mantenimiento.
- Optimizar el plan de mantenimiento de las locomotoras tipo BBB 2400.
- Proponer una metodología para llevar el control de los indicadores de mantenimiento en las locomotoras tipo BBB2400.

## **1.3 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 FEED.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO DE REFERENCIA

#### 2.1 Antecedentes y estudios previos

Durante la revisión de la literatura referente al tema de investigación planteado se ha encontrado un documento titulado “Evaluación de la confiabilidad de equipos mediante el seguimiento de indicadores. Aplicación a la Industria Ferroviaria”, en el cual se expone una metodología para la evaluación de la confiabilidad en equipos a través del seguimiento de indicadores de confiabilidad tales como la fiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, realizándose además una aplicación a la industria ferroviaria.

Los resultados de la aplicación de la metodología fueron presentados en el 27 congreso Nacional de Estadística e investigación Operativa en Lleida del 8 al 11 de abril del 2003, este trabajo forma parte del proyecto de investigación GV00-048-11 subvencionado por la Conselleria de Cultura, Educació i Ciència. Direcció General d'Ensenyances Universitàries i Investigació de la Generalitat Valenciana.

La investigación parte de la consigna de que:

Para realizar el seguimiento de los requisitos de confiabilidad es posible la utilización de una serie de parámetros que permiten conocer el estado del equipo respecto a los diferentes factores que engloban la confiabilidad, los cuales se encuentran relacionados entre sí. De esa forma garantizar una fiabilidad y una disponibilidad adecuada resulta posible si se consigue un buen diseño, se realiza un mantenimiento adecuado y se persigue una mejora continua del diseño y del mantenimiento. (Sánchez, y otros, 2003 pág. 3)

La metodología utilizada para establecer el cumplimiento de los requisitos de confiabilidad de los equipos y sistemas, mediante la realización de la evaluación y posterior seguimiento de aquellos indicadores que se consideren representativos dentro de las diferentes áreas que engloba la confiabilidad, está constituida de cuatro etapas:

- Obtención de la información;
- Diseño de indicadores;
- Diseño de equipos; y
- Evaluación y seguimiento de indicadores.

Uno de los aspectos más importantes de este estudio son los indicadores de confiabilidad utilizados para la aplicación concreta y el tipo de datos operacionales de que se dispusieron, además se tomó en cuenta el tipo de equipo analizado y la consideración de si es o no un equipo reparable y si se encuentra normalmente en operación o en espera (Sánchez, y otros, 2003 pág. 3).

Una vez considerados las etapas presentadas en el estudio se explica el caso de aplicación de la metodología, el cual tuvo como objetivo el demostrar la aplicabilidad y viabilidad de la metodología a la que se hace alusión, por lo que se seleccionó vehículos ferroviarios para el análisis ya que estos presentan una alta complejidad tecnológica y la necesidad de alcanzar unos elevados coeficientes de seguridad (Sánchez, y otros, 2003 pág. 6).

Los activos sometidos al estudio fueron 18 vehículos ferroviarios que datan del año 1995, todos de similares características en relación a su diseño, funcionamiento y operación, en cuanto a los fallos estos se consideraron en dos niveles, estos son (Sánchez, y otros, 2003 pág. 6):

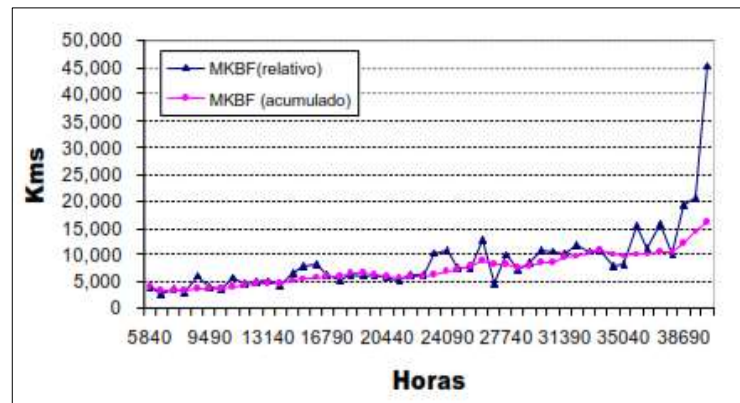
Los fallos mayores, que corresponderían a aquellos que afectan a la calidad del servicio, debido a que serían causantes de la paralización del vehículo o producen un retraso mayor de 3 minutos, o afectan a la disponibilidad de la unidad en el sentido de que no permiten que la unidad esté disponible en una determinada hora para la prestación del servicio (Sánchez, y otros, 2003 pág. 7).

Los fallos menores, que son aquellos que pueden ser subsanados con la aplicación de operaciones de mantenimiento programado. El estudio se centró en los fallos mayores, puesto que estos son los que originan la pérdida de funcionalidad de alguno de los sistemas afectando seriamente a la disponibilidad del vehículo (Sánchez, y otros, 2003 pág. 7).

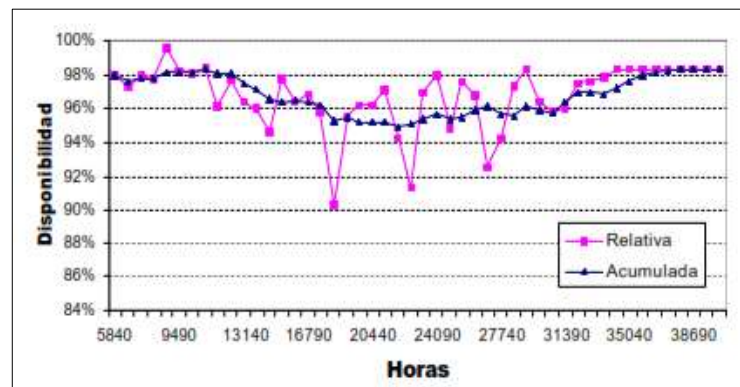
Los indicadores que se usaron en el caso aplicado para los vehículos ferroviarios fueron los siguientes:

- Fiabilidad: KMBF en lugar de MTBF por tratarse de una medida más representativa en el caso concreto de vehículos ferroviarios.
- Mantenibilidad: MTTR o tiempo medio entre fallos;
- Disponibilidad en porcentaje (Sánchez, y otros, 2003 pág. 7).

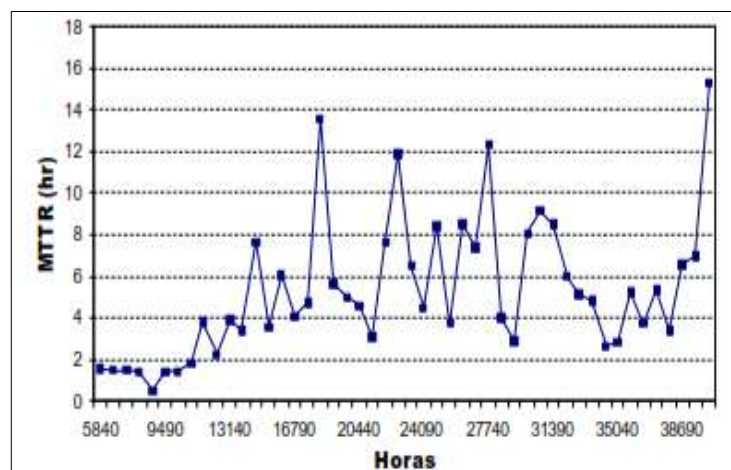
De las unidades analizadas se contó con un historial de fallas que data de un período de cinco años, la aplicación de los indicadores arrojó los siguientes resultados los cuales se aprecian en la Figura 1-2, Figura 2-2, y Figura 3-2, los cuales resumen el comportamiento de las unidades en 5 años de operación.



**Figura 1-2.** Evolución del MKBF (Kms)  
Fuente: (Sánchez, y otros, 2003)



**Figura 2-2.** Evolución de la Disponibilidad  
Fuente: (Sánchez, y otros, 2003)



**Figura 3-2.** Evolución del tiempo medio de restauración  
Fuente: (Sánchez, y otros, 2003)

Como análisis del estudio, los autores citan que en primer lugar el MKBF ha ido aumentando a lo largo del tiempo, como se esperaba durante la primera etapa del ciclo de vida, el número de fallos fue mayor debido a la existencia de fallos infantiles, posteriormente el valor del MKBF se estabiliza manteniéndose en todo momento por encima del valor objetivo fijado que corresponde a 7215 Km (Sánchez, y otros, 2003 pág. 9).

Con respecto a los niveles de disponibilidad, el análisis refiere que los mismos se han estabilizado en el último período en valores superiores al 98% y a lo largo del tiempo de observación siempre se han mantenido por encima del 90% (Sánchez, y otros, 2003 pág. 9).

La propuesta de esta investigación es el demostrar que el seguimiento de indicadores referentes a la confiabilidad, son perfectamente aplicables a la industria ferroviaria. Como se aprecia en la Figura 3-2, los valores del MTTR no presentan una conclusión en el documento, pero se puede apreciar que este indicador, no muestra valores estables revelando que se debe evaluar la gestión del mantenimiento, para su posterior optimización.

La propuesta presentada tiene como alcances la aplicación de los indicadores y su interpretación, pero esta no compete una evaluación profunda ni la propuesta de soluciones que permitan mejorar los indicadores, el objetivo siguiente será el dar continuidad a este tipo de propuestas y su aplicación al sector ferroviario incorporando además al análisis de los indicadores distribuciones estadísticas aplicadas al mantenimiento.

## **2.2 Locomotora diésel eléctrica tipo BBB 2400**

### **2.2.1 Generalidades**

Las locomotoras tipo BBB 2400 son locomotoras a Diésel eléctricas de origen francés fabricadas por la marca Alstom en 1992, este vehículo posee un ancho de vía de 1067 mm y cuenta con una transmisión eléctrica.

Estas locomotoras fueron fabricadas específicamente para el Ecuador y están destinadas a asegurar el remolque de trenes de toda naturaleza para ello cuentan en su interior con un motor de combustión interna Diésel acoplado a un generador trifásico el cual

suministra corriente eléctrica a los motores de tracción los cuales posteriormente comunican a las ruedas la fuerza tractiva que mueve a la locomotora (Ecured, 2015).

En este tipo de locomotora al contar con una transmisión eléctrica no existe una conexión mecánica entre el motor principal y los motores de tracción, disponiéndose de un motor de tracción por cada eje, siendo estos un total de 6. Los motores de tracción se alimentan con corriente eléctrica y luego, por medio de piñones, mueven las ruedas (Ecured, 2015).

La locomotora puede utilizarse en dos variantes:

- En unidad simple (US).
- En unidad múltiple (UM) entre ellas.

La potencia estándar de normas UIC es de 2400 CV (1766 KW) (GEC ALSTHOM, 1992).



**Figura 4-2.** Locomotora tipo BBB 2400.  
Fuente: (Jtcurses, 2012)

## **2.2.2 Características principales de la locomotora**

Las locomotoras diésel eléctricas de FEED cuentan con diversos sistemas automotrices, entre mecánicos, eléctricos, neumáticos, térmicos, etc. Por lo que, para la adecuada ejecución de las actividades de mantenimiento, es necesario conocer las características mecánicas y tractivas más importantes.

### **2.2.2.1 Características mecánicas**

En lo que respecta a las características mecánicas en la Tabla 1-2, se indican las más sobresalientes y que se deben considerar en el mantenimiento.

**Tabla 1-2:** Características mecánicas de la locomotora.

CARACTERÍSTICA	ESPECIFICACIÓN
Tipo	BBB
Cantidad de motores por bogíes	2
Separación de los rieles	1067 mm
Diámetro de las ruedas nuevas	914 mm
Diámetro de las ruedas en límite de desgaste	844 mm
Relación de multiplicación	81/16
Separación bajo tren de engranes (ruedas nuevas)	111
Altura máxima	3752,5 mm
Ancho en el retorno	2800 mm
Longitud del armazón de la caja	15180 mm
Distancia entre pivotes de bogíes	13424 mm
Distancia entre ejes de las ruedas total	2200 mm
Peso total en orden de marcha	80400Kg.
Capacidad del depósito de carburante	4400 litros
Capacidad del depósito de agua	147 litros
Capacidad del depósito de aire principal	500 litros
Capacidad del depósito de aire auxiliar	25 litros

Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

Fuente: (GEC ALSTHOM, 1992)

### 2.2.2.2 Características de tracción

Las características de tracción de locomotora más importantes, se describen en la Tabla 2-2, de ella se puede destacar que esta información es útil para la elaboración de fichas técnicas.

**Tabla 2-2:** Características de tracción de la locomotora.

CARACTERÍSTICA	ESPECIFICACIÓN
Cantidad de motores diésel	1
Tipo de motor diésel	12 PA4 V200 VG
Fabricante del motor diésel	SEMT PIELSTICK
Potencia nominal UIC del motor diésel a 1500 RPM	1766KW
Potencia de la locomotora en el sistema	1250 KW
Tipo de transmisión	Electricidad continua trifásica
Tipo de generador principal	AT 4-32
Tipo de rectificadores principales	R9 GO 2222
Tipo de alternador auxiliar	12LSX 1544
Tipo de motores de tracción	TA 671G
Tipo de baterías	Secas de 12 V
Tensión de los auxiliares	72V
Frenado	AIRE

Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

Fuente: (GEC ALSTHOM, 1992)

### 2.2.2.3 Prestaciones de la locomotora

Entre la información sobre la performance de la locomotora la Tabla 3-2, resume las características más importantes referentes a las prestaciones de la locomotora.

**Tabla 3-2:** Prestaciones de la locomotora

PRESTACIONES	
Velocidad máxima	70 Km/h
Velocidad en régimen continuo (campo Pleno)	19Km/h
Esfuerzo en tracción de arranque en la llanta 28,6 adh	22560daN
Esfuerzo de tracción continua en la llanta 20,9 adh	16480daN

**Realizado por:** Ing. Luis F. Buenaño M.

**Fuente:** (GEC ALSTHOM, 1992)

### 2.2.3 Elementos principales que constituyen la locomotora

Los elementos principales que constituyen la locomotora se pueden apreciar en la Figura 5-2. Mientras que la lista de componentes se encuentra en la Tabla 4-2.

**Tabla 4-2:** Elementos principales de la locomotora.

N°	Nomenclatura
1	Motor diésel
2	Alternador
3	Bloque rectificador
4	Generador auxiliar
5	Bloque aparelaje eléctrico
6	Frenado reostático
7	Ventilador motores de tracción
8	Baterías
9	Radiadores
10	Ventilador radiadores
11	Tanque de agua
12	Tanque de combustible
13	Unidad de bomba de combustible
14	Unidad de engrase previo
16	Filtros
17	Filtros diésel
18	Bloque aparelaje neumático
19	Compresor
23	Depósitos de aire
24	Areneros

**Realizado por:** Ing. Luis F. Buenaño M.

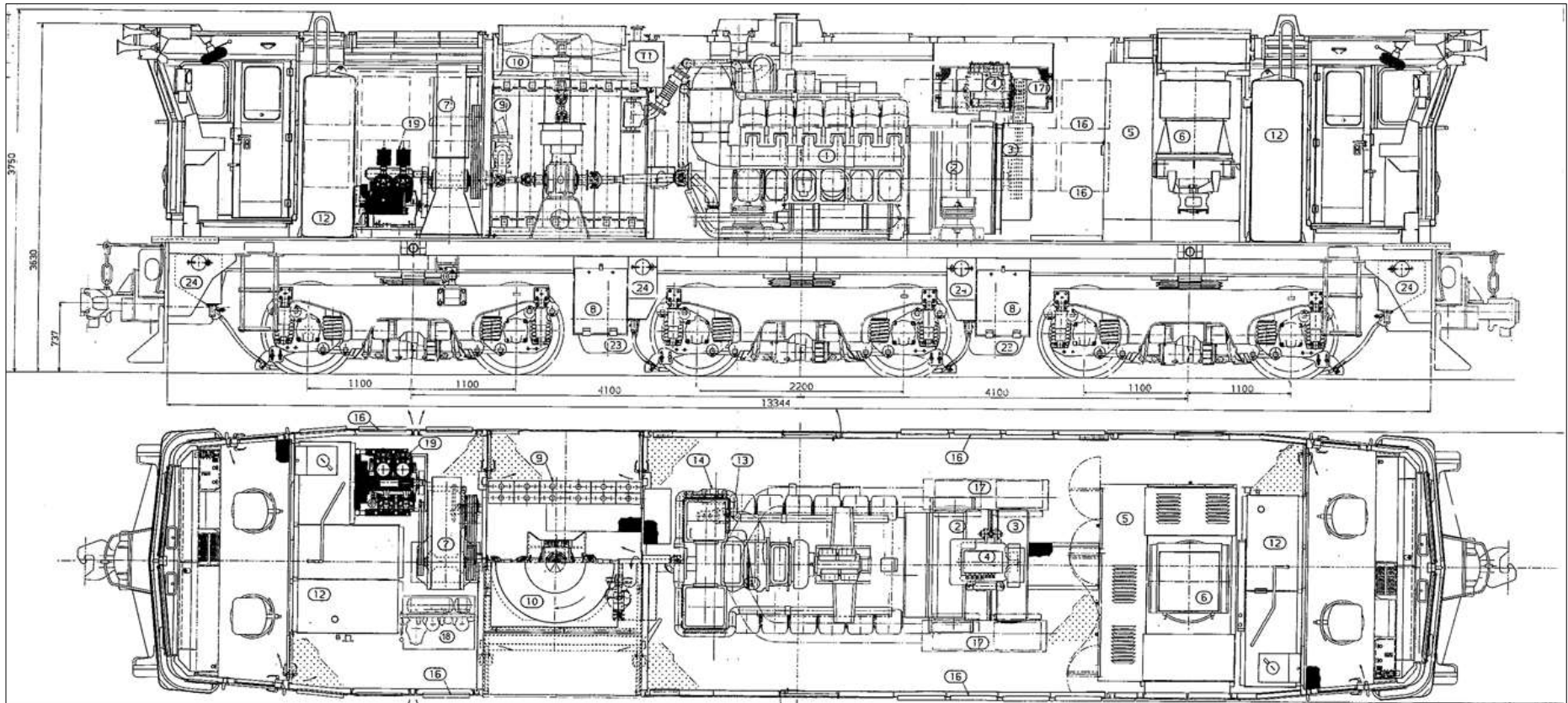
**Fuente:** (GEC ALSTHOM, 1992)

#### 2.2.3.1 La caja

Constituye el aspecto característico de la locomotora y contiene un chasis de caja que soporta:

- Las cabinas de conducción.
- El compartimiento motriz.
- El compartimiento de enfriamiento.
- El compartimiento de producción de aire (GEC ALSTHOM, 1992).





**Figura 5-2.** Elementos principales que constituyen la locomotora.  
Fuente: (GEC ALSTHOM, 1992)

## Las cabinas de conducción

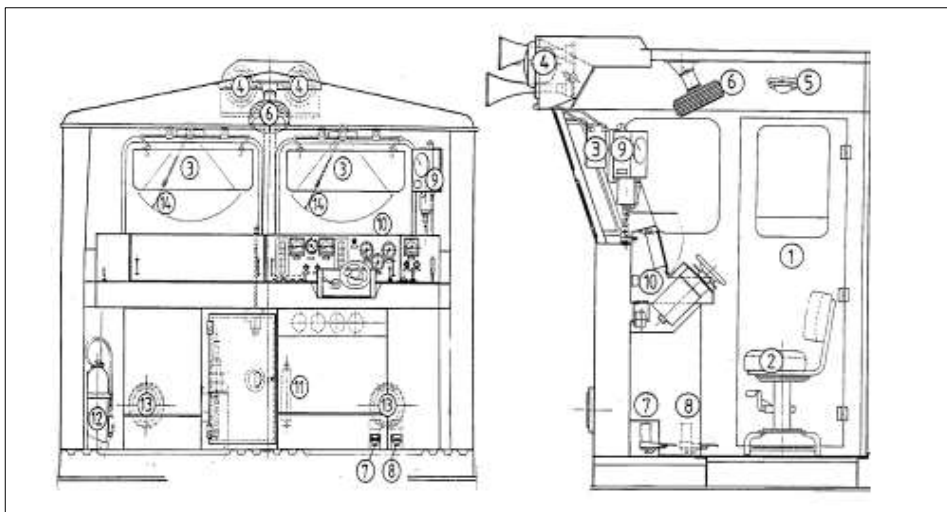
Incluyen cada una un tablero de conducción. Véase la Figura 6-2 y la Tabla 5-2.

## El compartimiento motriz

En el cual se encuentran los corredores laterales para acceso al equipo:

El equipo está constituido por tres sectores:

- Sector cabina 1
  - El bloque de frenado reostático con su ventilador
  - Equipo eléctrico de alta y baja tensión
- Sector central
  - El alternador principal para la alimentación de los motores de tracción
  - La estatodina utilizada para la alimentación de la excitación del alternador principal y para cargar la batería
  - Un bloque rectificador
  - El motor Diésel y sus diferentes circuitos (aceite, agua, combustible)
- Sector compartimiento de enfriamiento
  - Un turbocompresor
  - Un depósito de agua (GEC ALSTHOM, 1992).



**Figura 6-2.** Cabinas de conducción.  
Fuente: (GEC ALSTHOM, 1992)

**Tabla 5-2:** Elementos de las cabinas de conducción.

<b>REF</b>	<b>DESCRIPCION</b>
<b>1</b>	Puerta de acceso
<b>2</b>	Asiento pivotante
<b>3</b>	Parasol
<b>4</b>	Proyector central
<b>5</b>	Luces
<b>6</b>	Ventilador
<b>7</b>	Pedal hombre muerto
<b>8</b>	Pedal de aislamiento del freno (locomotora)
<b>9</b>	Registrador de velocidad
<b>10</b>	Pupitre de conducción
<b>11</b>	Equipo de conducción
<b>12</b>	Extintor de polvo
<b>13</b>	Luces de señalización
<b>14</b>	Limpia parabrisas

Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

Fuente: (GEC ALSTHOM, 1992)

### **El compartimiento de enfriamiento**

El cual incluye corredores laterales en donde se encuentran:

- Los radiadores
- El ventilador de los radiadores

### **El compartimiento de producción de aire**

Está constituido por:

- El compresor de aire
- El bloque neumático
- Un depósito de combustible
- El ventilador de los motores de tracción.

Bajo las cajas se encuentran instalados:

- Dos depósitos principales RP
- La batería de acumuladores

Finalmente, los bogies con dos ejes motrices y pivote central están ligados a la caja y alas piezas de rodamiento por una suspensión. Dos motores de tracción se encuentran fijados en cada bogie. (GEC ALSTHOM, 1992)

#### **2.2.4 *Sistemas principales de la locomotora***

La locomotora Gec Alsthom tipo BBB 2400, está constituida por 4 grupos o sistemas principales bajo los cuales se organizan los planes de mantenimiento, estos son:

- Sistema térmico
- Sistema neumático
- Sistema mecánico
- Sistema eléctrico

#### 2.2.4.1 *Sistema térmico*

El sistema térmico de esta locomotora lo integran esencialmente:

- Generador principal
- Circuito de aceite de engrase
- Circuito carburante
- Mando de velocidad del motor
- Refrigeración del motor

#### **Generador principal**

Construido por SEMT PIEKSTICK, se trata de un motor en V de 12 cilindros sobrealimentado por un turbocompresor BBC VTR 250-2 accionado por los diferentes gases del motor. La velocidad de rotación del motor Diésel es de 1400 RPM a carga plena y en ralentí su velocidad es de 700 RPM. Su potencia nominal UIC, a 1500 RPM, es de 2400 caballos (GEC ALSTHOM, 1992).

El turbocompresor está montado en el motor Diésel, en el interior de la V formada por los cilindros. Los colectores de escape del motor están conectados al cárter en voluta de los rotores de la turbina, accionados por los gases de escape. Los gases de escape abandonan las turbinas por una tubería de escape que pasa por el techo (GEC ALSTHOM, 1992).

El aire para el motor Diésel se filtra por 8 filtros de papel. La caída de presión máxima admisible cuando el motor está en potencia nominal es de 250 mm CA (GEC ALSTHOM, 1992).

#### **Circuito de aceite de engrase**

Un grupo moto bomba de pre engrase (PGR) se utiliza para lubricar el motor antes de cada arranque. Este grupo está equipado con una válvula de descompresión regulada a 5

bares, un dispositivo de seguridad eléctrica permite únicamente el arranque después de un período de pre engrase de 30 segundos (GEC ALSTHOM, 1992).

Entonces se constituye la presión de aceite en el circuito gracias a dos bombas de engranaje accionadas por motor (PH) y equipadas con válvulas de descompresión reguladas a 12 bares. El aceite se filtra mediante un filtro de menos de 20 micrones (GEC ALSTHOM, 1992).

El aceite se refrigera por paso dentro del intercambiador de aceite (EH) y en caso de obstrucción del filtro, una válvula de descompresión regulada a 6 bares envía el aceite al cárter motor (GEC ALSTHOM, 1992).

### **Circuito de carburante**

El motor diésel está alimentado por un grupo motobomba de combustible que funciona en permanencia (PGO). La bomba eléctrica (PGO) aspira el combustible a través de un pre filtro y alimenta la bomba de inyección a través del filtro.

### **Mando de velocidad del motor**

La velocidad del motor está dirigida por un regulador hidráulico Woodward accionado por un depósito de aire de mando de la velocidad.

Un servomecanismo está montado en el extremo del motor Diésel que está accionado por el aire comprimido suministrado a partir de un depósito cuya presión está dirigida por dos válvulas eléctricas que a su vez está dirigido por los contactos eléctricos del controlador principal, este mecanismo dirige el regulador (GEC ALSTHOM, 1992).

### **Refrigeración del motor**

Este sistema tiene la misión de refrigerar al motor de combustión interna, para ello está constituido de dos circuitos de agua:

- Circuito de baja temperatura (BT)
- Circuito de alta temperatura (AT)

Estos dos circuitos se ponen a presión estática por el depósito de agua situado a nivel superior de la locomotora (GEC ALSTHOM, 1992).

**Circuito de baja temperatura (bt):** En este circuito la circulación de agua de baja temperatura (BT) está asegurada por una bomba centrífuga (PEBT) accionada por un conjunto de engranajes a partir del cigüeñal (GEC ALSTHOM, 1992).

El agua de refrigeración circula en:

- Los refrigeradores de aire
- el intercambiador térmico agua/aceite
- los radiadores enfriados por aire.

**Circuito de alta temperatura (AT):** La circulación de agua en el circuito de alta temperatura (AT) está asegurada por la bomba centrífuga (PEHT) fijada del lado extremo del chasis motor y accionada por el extremo del conjunto de engranaje a partir del cigüeñal (GEC ALSTHOM, 1992).

El circuito (AT) está ligeramente presurizado por la bomba del circuito de baja temperatura (PEBT). Ello permite el funcionamiento del motor a altas temperaturas sin riesgos de ebullición y evita así los efectos de cavitación.

A partir de la bomba de agua (PEHT), el agua de refrigeración se encamina hacia:

- La envoltura del cilindro y de las culatas,
- El turbocompresor (TS) (GEC ALSTHOM, 1992).

#### 2.2.4.2 Sistema neumático

El sistema neumático está encargado de la producción de aire comprimido en la locomotora para asegurar las funciones de (GEC ALSTHOM, 1992):

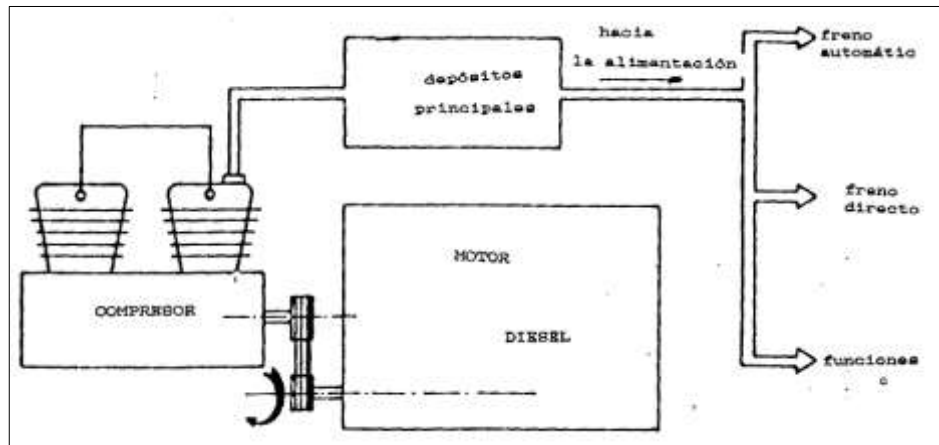
- El equipo de frenado
- auxiliares accionados por energía neumática.

Está esencialmente constituido por:

#### **El compresor**

La producción de aire comprimido se asegura mediante un compresor Westinghouse 243 VC 78 accionado por una correa a partir del motor Diésel. Este aire se almacena en 2 depósitos principales RP, y luego se distribuye a los diferentes equipos del freno y

funciones. El principio de producción de aire se encuentra representado en la Figura 7-2 (GEC ALSTHOM, 1992).



**Figura 7-2.** Principio de producción de aire.  
Fuente: (GEC ALSTHOM, 1992)

### El equipo de frenado

La locomotora se puede frenar mediante una válvula de frenado directo “pilotair” o la válvula de frenado neumática del tren situado en cada cabina de conducción (GEC ALSTHOM, 1992).

Este equipo está constituido por los siguientes subsistemas:

- Un freno continuo automático el cual incluye particularmente un distribuidor único. Está comandado por una llave del mecánico con mando eléctrico tipo PBL3; en este freno, la presión de un depósito de equilibrio, en función de las acciones sobre la palanca de mando de frenado, se utiliza como referencia para dirigir la tubería del freno neumático y permite el apriete y el afloje del freno.
- Un equipo de frenado neumático directo el cual actúa únicamente sobre las ruedas de la locomotora.
- Un freno de estacionamiento, el cual actúa sobre 6 cilindros de freno en la locomotora y se lo utiliza para inmovilizarla (GEC ALSTHOM, 1992).

### Funciones auxiliares

Los subsistemas auxiliares comprenden:

- Los equipos auxiliares tales como el enarenado, limpia parabrisas, bocina de ruta, engrasadores de pestañas.

- Los equipos electropneumáticos (inversores, conmutadores de selección tracción/frenado, contactores de líneas).
- El regulador de presión del compresor (GEC ALSTHOM, 1992).

#### 2.2.4.3 Sistema mecánico

El sistema mecánico de la locomotora incluye una caja de 2 cabinas de conducción la misma que descansa sobre 3 bogies con 2 ejes motrices cada uno, varias uniones entre el equipo de rodamiento, chasis de bogies y chasis de caja, permiten asegurar las funciones esenciales que son las siguientes (GEC ALSTHOM, 1992):

- Manejo de la locomotora
- Suspensión de la locomotora
- Transmisión del esfuerzo de tracción.

En el sistema mecánico se incluye además el arrastre de los equipos auxiliares, a continuación se describen los elementos constitutivos del grupo mecánico (GEC ALSTHOM, 1992).

**Descripción de la caja:** La caja de la locomotora está constituida por un chasis sobre el cual se sitúan superestructuras que protegen el equipo. El equipo y las superestructuras se mantienen en su lugar por tornillos en el chasis.

Los equipos neumáticos y eléctricos, al igual que los enarenadores y los equipos de enganche, están situados sobre el chasis entre los bogies. La caja descansa sobre los bogies por medio de bloques de caucho (GEC ALSTHOM, 1992).

El chasis dispone de vigas centrales y garantiza la resistencia estructural de la caja, dos vigas están conectadas por un larguero superior a la chapa. El larguero superior sirve de piso a la locomotora y brinda una superficie perfectamente uniforme para instalar los equipos y los capós (GEC ALSTHOM, 1992).

En cada extremo del chasis hay soldada una placa de cabeza sobre la que están fijados:

- Los enganches automáticos;
- Los semiacoplamientos de freno;
- Las conexiones M.U;
- Los aparta ganado.

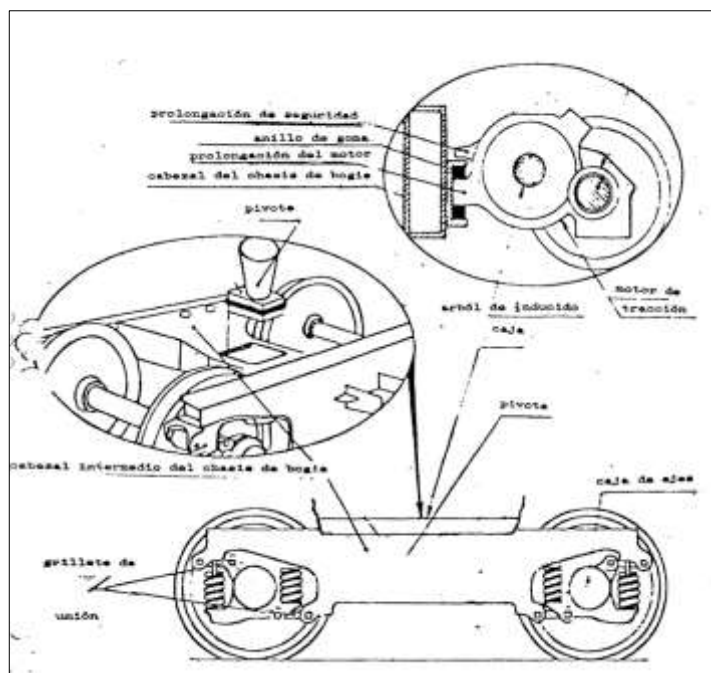


## Suspensión de la locomotora

La suspensión de la locomotora tiene por objetivo absorber los choques, vibraciones e irregularidades del rodamiento (paso sobre juntas de rieles, agujas, etc.) y repartir la carga del vehículo sobre todos los ejes.

El sistema de suspensión que se puede apreciar en la Figura 8-2, necesita de uniones verticales elásticas entre los equipos de rodamiento, los chasis de bogies y la caja. Esta unión constituye dos pisos de suspensión (GEC ALSTHOM, 1992):

- Una suspensión entre equipos de rodamiento y chasis de bogie llamada "suspensión primaria" y constituida por:
  - Resortes helicoidales situados en ambos lados de cada una de las cajas de ejes y aseguran una unión elástica con la caja de ejes-chasis de bogie, obsérvese la Figura 8-2.
  - Grilletes de unión silentbloc situadas entre las cajas de ejes y el chasis de bogie permitiendo así el desplazamiento vertical del bogie tal como se aprecia en la Figura 8-2.
- Una suspensión entre chasis de bogie y caja llamada "suspensión secundaria".
- Un amortiguador de aceite situado en la parte exterior de cada caja de ejes. (GEC ALSTHOM, 1992).



**Figura 8-2.** Suspensión de la locomotora.  
Fuente: (GEC ALSTHOM, 1992)

## **Arrastre de los equipos auxiliares**

Los equipos auxiliares son arrastrados por correas y juntas de cardán, las velocidades se obtienen ya sea por relación de engranaje como en el caso del ventilador de radiador o bien por la relación de los diámetros de la polea.

Como los equipos auxiliares se arrastran mecánicamente, su velocidad depende de la del motor diésel. Los equipos auxiliares se pueden dividir en dos grupos (GEC ALSTHOM, 1992) :

- Equipos auxiliares instalados en el generador; se trata del generador auxiliar y sus mecanismos de arrastre.
- Equipos auxiliares instalados en la locomotora que son los siguientes:
  - Un árbol de arrastre de cardán fijado en el cigüeñal del motor por un tambor que permite acoplar y arrastrar la caja de engranaje cónico VTRA del ventilador de radiador.
  - Un árbol de cardán acoplado al árbol horizontal sobre la caja de engranaje cónico del lado auxiliar. Este árbol de cardán arrastra los extractores del compresor y un soplador para el motor de tracción.

## **Bogies**

El bogie con el que se equipa la locomotora es del tipo de 2 ejes con mando individual, en él se encuentran instalados motores de tracción suspendidos por el extremo.

El bogie está constituido esencialmente de (GEC ALSTHOM, 1992):

- Un chasis de bogie que soporta los ejes y reparte el peso de la caja sobre cada uno de ellos.
- Dos ejes con manguetas exteriores equipadas con cajas de rodamientos.
- Dos motores de tracción suspendidos por el extremo, cada uno de los cuales acciona un eje por medio de un par de engranajes.
- Dos niveles de suspensión que comprenden una suspensión secundaria constituida de bloques sandwich que permiten la libre rotación de los bogies bajo la caja y, una suspensión primaria independiente, del tipo ALSTHOM.
- Un pivote no cargado, fijado bajo el chasis de caja de la locomotora, que asegura los esfuerzos de accionamiento y de frenado.

- El frenado se asegura también por bloques frenos en cada rueda, montados en el chasis.
- Dispositivos particulares (enarenado, quitapiedras, toma de fuerza y engrasadores de pestaña de rueda) (GEC ALSTHOM, 1992).

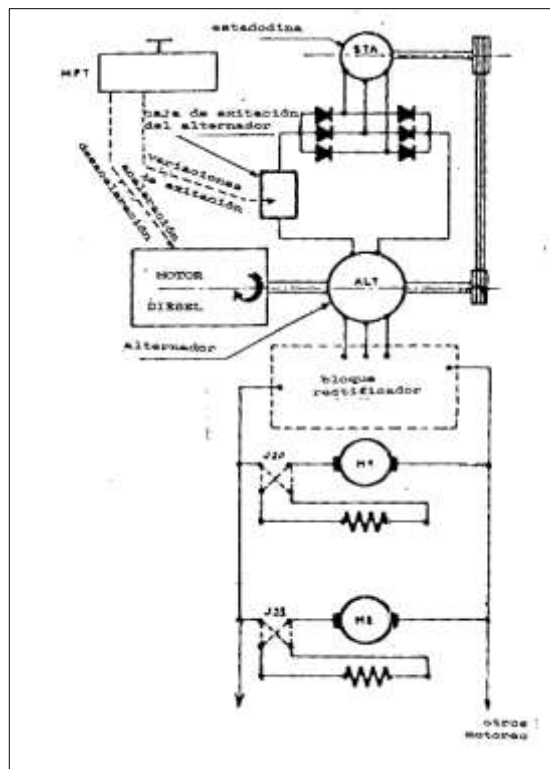
#### 2.2.4.4 Sistema eléctrico

El sistema eléctrico de la locomotora agrupa el circuito de potencia, arranque, los circuitos de mando y de control y los circuitos de iluminación.

#### Circuito de potencia

Este circuito tiene la misión de asegurar la transmisión de la potencia del motor diésel a las ruedas de la locomotora la cual se efectúa eléctricamente mediante un alternador principal accionado por el motor diésel, el principio de funcionamiento se puede apreciar en la Figura 9-2 (GEC ALSTHOM, 1992).

**En tracción:** El motor Diésel arrastra el alternador principal ALT trifásico, la corriente producida es rectificada por un bloque rectificador y alimenta 6 motores de tracción M1 hasta M6, del tipo “serie continua”, acoplados en paralelo.



**Figura 9-2.** Circuito de potencia de la locomotora.  
Fuente: (GEC ALSTHOM, 1992)

Dos inversores J20 y J21 permiten invertir el sentido de la corriente en los inductores para cambiar el sentido de desplazamiento de las locomotoras.

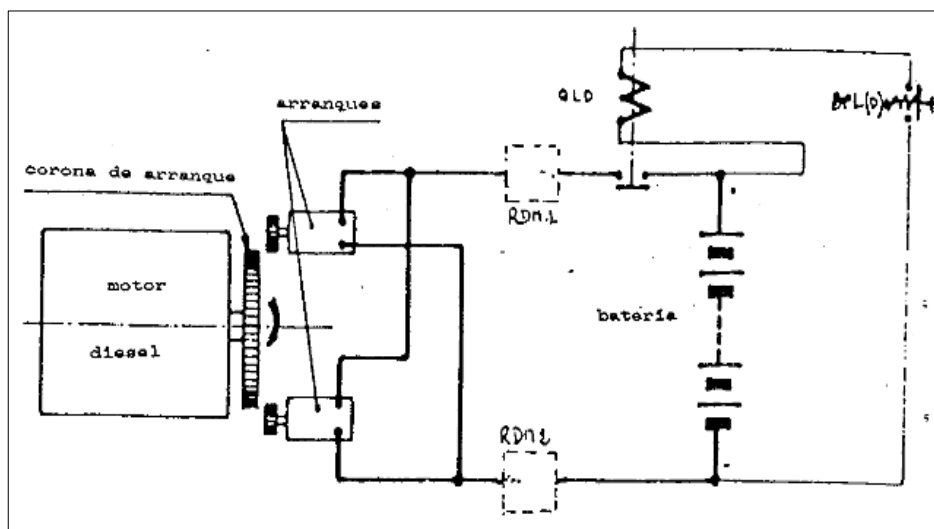
**En frenado:** La corriente del alternador principal, después de la rectificación por el puente de diodos; alimenta en serie los 6 inductores de los motores, los inducidos de los motores suministran cada uno en una resistencia de frenado RF. (Los motores funcionan en generatriz).

Los inversores J20, J21, TF30, TF31 y los contactos CEFR y L1 a L6 permiten establecer el circuito de tracción o de frenado, para uno u otro sentido de marcha de la locomotora (GEC ALSTHOM, 1992).

### Arranque

El principio de funcionamiento del circuito de arranque del motor diésel se puede apreciar en la Figura 10-2. El arranque del motor Diésel se realiza con la ayuda de dos arrancadores eléctricos alimentados por la batería engranados sobre los dientes de una corona de arranque, estos arrancadores se alimentan por medio de un relé de arranque Diésel QLD.

El arranque está dirigido por un operador mecánico por medio de un botón-presión de arranque del motor Diésel BP(L)D (GEC ALSTHOM, 1992).



**Figura 10-2.** Arranque del motor diésel.  
Fuente: (GEC ALSTHOM, 1992)

### Circuitos de mando y de control

Estos circuitos de las diferentes fases de mando y control del funcionamiento de la locomotora se descomponen en cuatro circuitos principales, estos son:

- Preparación y lanzamiento diésel: controla las diferentes fases de lanzamiento y de parada diésel, es decir:
  - Puesta bajo tensión.
  - Control del ralentí diésel.
  - Lanzamiento diésel – preparación (preengrase y alimentación del motor con gas oil).
  - Lanzamiento diésel – lanzamiento (arranque del motor diésel).
  - Parada del motor (Por acción del botón de parada, defectos de presión de aceite o agua, sobrevelocidad).
  - Regulación del ventilador radiador.
  - Control de temperatura.
- Tracción: este circuito está diseñado para controlar:
  - El establecimiento y corte de la tracción.
  - El mando del sentido de marcha.
  - El control del establecimiento del circuito de potencia.
  - El mando de los contactores de línea.
  - Mando de las excitaciones
  - Mando de velocidad diésel
  - Control del arranque del tren
  - Señalización luminosa en tracción
- Frenado reostático, que comprende:
  - Establecimiento del frenado
  - Selector de rampa
  - Control del establecimiento del circuito de potencia (circuitos de frenado, es decir, los circuitos de potencia y los circuitos de excitación).
  - Control del establecimiento del circuito de excitación.
  - Mando de la velocidad diésel en frenado.
  - Seguridades durante el frenado.
  - Urgencia neumática el cual dispara un freno neumático de urgencia cuando se detecta un defecto.
  - Señalización luminosa durante el frenado
- Circuitos comunes en tracción y frenado, comprende circuitos que no tienen una vinculación específica con la tracción o frenado:

- Mando de regulación del compresor
- Patinaje y enarenado
- Mando de engrasadores de pestañas
- Mando de las bocinas
- Contador horario
- Cuenta revoluciones
- Indicador de temperatura
- Vigilancia automática con control de mantenimiento de apoyo
- Mando del freno PBL3
- Freno de inmovilización

Para asegurar todas las funciones antes descritas, estos circuitos utilizan relés y contactores temporizados, electroválvulas, actuadores y circuitos de protección adecuados (GEC ALSTHOM, 1992).

### **Circuitos de iluminación**

Estos circuitos se encargan de asegurar la iluminación tanto interior como exterior de la locomotora.

**Iluminación interior:** Comprende la iluminación de:

- Compartimiento de la máquina
- Cabina
- Pupitre

**Iluminación exterior:** Encargado de asegurar la iluminación en cada superficie frontal de la locomotora, para ello se dispone de:

- Dos proyectores en cabeza de coche
- Dos redes en las caras de la cabina (GEC ALSTHOM, 1992).

## **2.3 Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad, y Mantenibilidad**

El análisis CDM (Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad), es también conocido como análisis RAM por sus siglas en inglés (Reliability, Availability and Maintainability), principalmente es utilizado para identificar las debilidades en un sistema y cuantificar el impacto de las fallas de los componentes (Vergara Rea, 2007 pág. 7).

“El análisis CMD, permite pronosticar la producción perdida y la indisponibilidad de un proceso de producción, de acuerdo a 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 pág. 19).

El análisis CDM se ampara en un modelo de simulación el cual toma en cuenta:

- La confiabilidad de los equipos.
- La configuración del sistema.
- Las fallas aleatorias y sus reparaciones.
- La influencia del “error humano”.
- Las pérdidas de capacidad por degradación.
- El tiempo fuera de servicio por mantenimiento planificado.
- Disponibilidad de recursos humanos y materiales.
- La probabilidad de ocurrencia de eventos especiales no deseados (Acevedo N., y otros, 2007 pág. 19).

La construcción de los TPPF y TPPR, son los parámetros indispensables para realizar este análisis en los diversos componentes, esto se realiza con base en información proveniente de bases de datos propias, bancos de datos genéricos de la industria y la opinión de expertos (Acevedo N., y otros, 2007 pág. 19).

Según (Acevedo N., y otros, 2007 pág. 19) el análisis CDM, persigue los siguientes objetivos:

- Predecir la mayoría de los escenarios de paros o fallas del proceso de producción, modelando las incertidumbres de los procesos de deterioros y fallas que soportarán los equipos, sub-sistemas y sistemas asociados al citado proceso de producción
- Identificar las implicaciones económicas de cada escenario probable, considerando la configuración de sistemas, confiabilidad de equipos, políticas de mantenimiento, programas de intervención de pozos y filosofía operacional, para así establecer las estrategias óptimas de mantenimiento del negocio.
- Presentar un análisis de sensibilidad con la finalidad de identificar los equipos y sistemas críticos, con el propósito de proponer acciones de mitigación, basadas en un análisis costo-riesgo.

Un modelo CDM, permite derivar el impacto que tienen en la disponibilidad y producción diferida del sistema ya sean: nuevas políticas del mantenimiento, cambios en la mantenibilidad de los equipos, aplicación de nuevas tecnologías, cambios en la configuración de los equipos dentro de los procesos de producción, cambios en la política de inventarios e implantación de nuevos métodos de producción, gracias a que puede actuar como un simulador “what if” (Acevedo N., y otros, 2007 pág. 20).

Al igual que para un análisis de criticidad, el análisis CDM se apoya en estándares y normas, de las cuales las más sobresalientes son:

- DOD – Department of Defence – Guide for achieving Reliability, Availability, and Maintainability.
- DoD 3235.1-H – Department of Defence – Test & Evaluation of System reliability, Availability and Maintainability.
- IEC61078: Analysis techniques for dependability – Reliability block diagram method.
- IEC61025: Fault tree analysis (Acevedo N., y otros, 2007 pág. 20)

### **2.3.1 Confiabilidad**

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 pág. 95).

La función de confiabilidad, supervivencia o fiabilidad  $R(t)$  es definida como la probabilidad de que un activo funcione adecuadamente durante un período determinado bajo condiciones operativas específicas que pueden ser por ejemplo: condiciones de presión, temperatura, velocidad, tensión o forma de una onda eléctrica, nivel de vibraciones, ..., etc. (López, 2012 pág. 5).

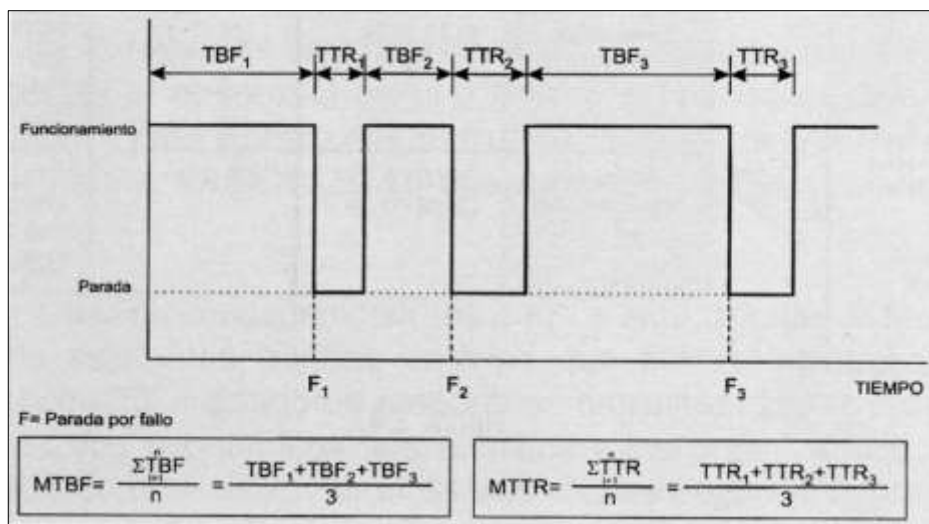
Es común representar a la fiabilidad con la letra R ya que proviene de la palabra inglesa Reliability, además una medida de la fiabilidad es el MTBF (Mean Time Between Failures), la cual se relaciona con la duración media entre fallos, y se puede expresar como:



$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad [1]$$

Según (López, 2012) en la práctica, la fiabilidad se mide como el tiempo medio entre ciclos de mantenimiento o el tiempo medio entre dos fallos consecutivos MTBF, y esto puede medirse en general por horas, kilómetros, horas de vuelo, piezas producidas, etc.

En la Figura 11-2, se puede observar los TBF, los cuales representan el tiempo de funcionamiento de un activo y los TTR que se refieren a los tiempos de paradas para reparación.



**Figura 11-2.** Representación de los estados TBF y TTR.  
Fuente: (López, 2012)

**La función Fiabilidad** representada como  $R(t)$ , representa la probabilidad de que un componente nuevo sobreviva más del tiempo  $t$ , donde  $T$  se define como la vida del bien o componente:

$$R(t) = P(T > t) = 1 - F(t) \quad [2]$$

**La función de Distribución Acumulada**  $F(t)$ , es la probabilidad de que un componente nuevo no sobreviva más del tiempo  $t$ .

$$F(t) = P(T \leq t) \quad [3]$$

**La función de Densidad**  $f(t)$ , se obtiene al derivar la expresión [ 3 ], obteniendo una función la cual da una idea de la dispersión de la vida del componente.

$$f(t) = \frac{d}{dt}F(t) \quad [4]$$

De acuerdo a (López, 2012 pág. 6) al dividir la ecuación [ 4 ] para la ecuación [ 2 ] se obtiene la **Tasa de fallos**  $\gamma(t)$ , la cual es una característica de la fiabilidad de un componente, y es muy común que el comportamiento de fallos de un componente sea descrito en términos de su tasa de fallos. La tasa de fallo puede interpretarse como la “velocidad” a la cual se producen los fallos, y puede ser considerada como una medida de lo propenso de un dispositivo a fallar en función de su edad (Juan, y otros, 2002 pág. 3).

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad [5]$$

### 2.3.2 *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 pág. 48).

$$M(t) = P(TTR < t) \quad [6]$$

De acuerdo a (López, 2012 pág. 7) una medida de la mantenibilidad es el MTTR (Mean Time To Repair) o “Tiempo Medio de Reparación”. En la Figura 11-2 se puede apreciar la representación de los TTR y la ecuación del MTTR.

La mantenibilidad es la propiedad de un sistema que representa la cantidad de esfuerzo requerido para conservar su funcionamiento normal o para restituirlo una vez se ha presentado un evento de fallo (López, 2012 pág. 7).

Un sistema es “Altamente Mantenable” cuando el esfuerzo asociado a la restitución es bajo. Sistemas poco mantenibles o de “Baja mantenibilidad” requieren de grandes esfuerzos para sostenerse o restituirse (López, 2012 pág. 7).

La Tasa de Reparación  $\mu(t)$  está definida por la siguiente expresión:

$$\mu(t) = \frac{1}{MTTR} \quad [7]$$

Según refiere (Torres, 2010 pág. 49) el TTR o tiempos técnicos para la reparación se componen en general de la suma de los tiempos siguientes:

- Tiempo de verificación de la realidad del fallo (las falsas alarmas son frecuentes en los circuitos electrónicos);
- Tiempo de diagnóstico;
- Tiempo de acceso al órgano que falla (retiradas y desmontajes);
- Tiempo de reemplazo o de reparación;
- Tiempo de re ensamblaje;
- Tiempo de control y ensayos.

### 2.3.3 Disponibilidad

La disponibilidad es la proporción de tiempo durante la cual un sistema o equipo estuvo en condiciones de ser usado (Torres, 2010 pág. 51).

Según (López, 2012 pág. 7) 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.

La disponibilidad se define en función de la fiabilidad y de la mantenibilidad, a través de la expresión matemática siguiente:

$$D(t) = \frac{R(t)}{R(t) + M(t)} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad [8]$$

Es así que se puede decir que la disponibilidad depende esencialmente de:

- El número de fallos (Fiabilidad);
- De la rapidez con que sean reparados (Mantenibilidad);
- De los procedimientos definidos para el mantenimiento (Mantenimiento);
- De la calidad de los medios aplicados (Logística).

Y de la compatibilidad de estos factores entre ellos (interdependencia) (Torres, 2010 pág. 51).

### 2.3.4 Diferentes disponibilidades de mayor uso empresarial

Al realizar estudios CMD, es importante destacar que se pueden utilizar algunas clases de disponibilidades, la elección de una de ellas tendrá que ver con los datos que se posean, con las expectativas de la empresa y con los elementos que se desean controlar (Mora Gutiérrez, 2009).

Entre las disponibilidades de mayor uso empresarial se tienen las siguientes:

**Disponibilidad genérica ( $D_G$ )**, es usada en organizaciones en las que no se manejan indicadores CMD, para realizar la medición solo se contemplan tiempos útiles y los de no funcionalidad, siendo adecuada para pruebas piloto en las empresas (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 77).

La disponibilidad genérica puede ser medida tomando en cuenta tanto mantenimientos correctivos como también mantenimientos preventivos. Para su cálculo se utiliza parámetros UT (Up time o tiempos útiles) y DT (Down time o tiempo en que la máquina ni funciona ni produce).

La siguiente ecuación representa la disponibilidad genérica sin considerar los mantenimientos preventivos:

$$D_G = \frac{\text{Media de los UT}}{\text{Media de los UT} + \text{Media de los DT}} = \frac{\frac{\sum_{i=1}^m UT_i}{m}}{\frac{\sum_{i=1}^m UT}{m} + \frac{\sum_{j=1}^n DT_j}{n}} \quad [9]$$

Donde:

m: número de eventos UT

n: número de eventos DT

Para la disponibilidad genérica con mantenimientos preventivos, se usa la siguiente expresión:

$$D_G = \frac{\text{Tiempo funcionamiento}}{\text{Tiempo en que puede operar}} = \frac{TT - \sum PM - \sum DT}{TT - \sum PM} \quad [10]$$

**Disponibilidad inherente o intrínseca ( $D_I$ )**, este tipo de disponibilidad se utiliza cuando se desea controlar las actividades de mantenimientos no planeados (correctivos y/o modificativos). Sus parámetros son MTBF y MTTR, sólo tiene en cuenta daños, fallas o

pérdidas de funcionalidad por razones propias del equipo y no exógenas a él (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 71).

Para el cálculo de la disponibilidad inherente se usa la siguiente expresión:

$$D_I = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad [11]$$

**Disponibilidad alcanzada (D<sub>A</sub>)**, el medir esta disponibilidad es excelente cuando se busca controlar las tareas planeadas de mantenimiento (preventivas o predictivas) y las correctivas por separado, esta disponibilidad no registra obligatoriamente tiempos de espera o demora y suele ser muy rigurosa en su cálculo (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 72).

A<sub>A</sub> es la probabilidad de que el sistema opere satisfactoriamente cuando se requiere en cualquier tiempo bajo condiciones de operación normales y en un entorno ideal de soporte logístico, sin considerar retraso ni logístico ni administrativo, pero involucra en sus cálculos los tiempos imputables a las actividades planeadas de mantenimiento, aparte de las acciones correctivas que ya trae desde la inherente o intrínseca. (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 83)

La disponibilidad alcanzada usa como parámetros de cálculo, MTBM, MTBM<sub>c</sub>, MTBM<sub>p</sub>, M<sub>p</sub>, y  $\bar{M}$ , la siguiente expresión mide la disponibilidad alcanzada:

$$D_A = \frac{MTBM}{MTBM + \bar{M}} = \frac{\frac{1}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}}}{\frac{1}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}} + \frac{\frac{MTTR}{MTBM_c} + \frac{M_p}{MTBM_c}}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}}} \quad [12]$$

Donde:

**MTBM** es Mean Time Between Maintenance o tiempo medio entre mantenimientos; Blachard y otros (citado por Mora Gutiérrez, 2009) menciona que el tiempo medio entre mantenimientos, más que un índice de confiabilidad es un indicador de la frecuencia de los mantenimientos que en ausencia de mantenimiento preventivo se aproxima al valor de MTBF y es función de la frecuencia de los mantenimientos planeados y no planeados.

**MTBMc** es el tiempo medio entre mantenimientos no planeados o correctivos, este se aproxima al MTBF en ausencia de los mantenimientos preventivos.

**MTBMp** es el tiempo medio entre mantenimientos planeados o preventivos.

$\overline{M}$  es el tiempo medio de mantenimiento activo que se requiere para realizar una tarea de mantenimiento; Blachard y otros (citado por Mora Gutiérrez, 2009) sugieren que es función de los tiempos medios de mantenimiento correctivo y planeado y sus frecuencias relativas, solo se consideran los tiempos activos de mantenimiento y no se tienen en cuenta los tiempos administrativos y tampoco logísticos.

**MTTR** es Mean Time To Repair o el tiempo neto medio para realizar reparaciones o mantenimientos correctivos.

**Mp** es el tiempo neto medio para ejecutar tareas proactivas de mantenimientos planeados.

Es pertinente mencionar además que en confiabilidad los tiempos útiles son inherentes al equipo o sistema, mientras que en mantenibilidad los tiempos de reparaciones o de tareas proactivas son inherentes al recurso humano que las realiza (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 83).

**Disponibilidad operacional  $D_o$** , “Es adecuada cuando se requiere vigilar de cerca los tiempos de demoras administrativas o de recursos físicos o humanos; trabaja con las actividades planeadas y no planeadas de mantenimiento, en forma conjunta” (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 72).

La implementación de este tipo de disponibilidad requiere de mucho esfuerzo y recursos económicos. Utiliza los mismos parámetros de la disponibilidad alcanzada más los correspondientes a demoras de tiempos logísticos y administrativos (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 72).

**Disponibilidad operacional generalizada  $D_{og}$** , se usa cuando se predice CMD en equipos con mucho tiempo de operación en que funcionan mas no producen, algo así como trabajar en vacío. Trabaja con los mismos parámetros de la operacional con el añadido de que los tiempos en que el equipo funciona pero no produce (Ready time) se agregan a los tiempos útiles más cercanos en fecha, de esta manera los tiempos útiles son aumentados (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 72).

Esta disponibilidad es la más compleja y completa, así como también, la más exigente y costosa de implementar, aparte de que la empresa debe tener ya mucha experiencia en el tema (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 72).

Finalmente se puede decir que al realizar mediciones CMD los diferentes factores que afectan la funcionalidad de los equipos son considerados por las distintas maneras de calcular la disponibilidad; en consecuencia, es la empresa la que asume la que más le conviene en función de los datos que posee, los parámetros que desea controlar y sus expectativas (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 72).

## **2.4 Mejoras en la confiabilidad, mantenibilidad, y disponibilidad**

El objetivo primario para realizar un plan de mejoras en la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, generalmente debe incluir lo siguiente (Vergara Rea, 2007 pág. 19):

- Identificar los sistemas, estructuras y componentes los cuales son potencialmente contribuidores a generar pérdidas o riesgos importantes e identificar aquellos quienes potencian las mejoras, es decir, incremento en confiabilidad, disponibilidad o mantenibilidad, pueden justificar los gastos de fondos.
- Identificar todas las tendencias importantes en el desempeño de las plantas y sistemas, estructuras y componentes e identificar áreas de posibles mejoras.
- Consistentemente identificar las causas de desempeño individual de problemas y definir medidas de remediación efectivas las cuales eliminen o prevengan su recurrencia.
- Consistentemente predecir la peor de las mejoras propuestas para guiar la justificación y jerarquización de los procesos para las modificaciones de planta y cambios, y optimizar gastos para proveer mayores beneficios dentro de un corto periodo de tiempo.
- Proveer un marco general para mantener una excelente documentación y una configuración de planta con riesgos optimizados la cual prevenga las violaciones inadvertidas de cualquier criterio determinístico o probabilísticos preestablecido o acuerdos los cuales son parte de las bases de diseño de las plantas.

De acuerdo a (Sexto, 2005 pág. 9) es preciso considerar que existe una relación dialéctica entre confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad. Muchas veces invertir en la

confiabilidad del activo no es la mejor forma de aumentar la disponibilidad, siendo una buena alternativa el considerar mejorar también la mantenibilidad.

El mejorar la confiabilidad a través de una política integral sobre los activos resulta una decisión y una oportunidad de demostrar cuán eficaz y eficiente se puede llegar a ser en comparación a lo que se es hoy o se fue ayer (Sexto, 2005 pág. 9).

## **2.5 Métodos de predicción CMD**

Para la predicción de CMD, existen varias alternativas las cuales difieren en su metodología y en su fundamentación técnica; de ellas unas son más adecuadas que otras y esto tiene que ver ya sea con el entorno y las características del grado posible o no de reparación de los elementos así como también con el grado de madurez técnico y científico de las personas o de la empresa que los utiliza (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 62).

Entre los modelos más utilizados se tiene:

### **2.5.1 Métodos de cálculo puntuales (o promedios)**

Se basan en el cálculo de promedios de cada uno de los parámetros de fallas, reparaciones, tiempos útiles entre otras variables calculables. Este método tiene como característica que su utilización es muy simple y adecuada para personas o empresas en que no se acostumbra a utilizar previsiones CMD (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 62).

Sin embargo, hay que mencionar que sus resultados no son muy aceptables gozando de poca credibilidad. Normalmente estas herramientas solo se utilizan para alisar en los modelos de pronósticos, y sus resultados infieren que todos los eventos o intervalos de tiempo son iguales, lo que en realidad no es cierto (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 63).

### **2.5.2 Métodos de distribuciones**

Estos métodos utilizan los mismos conceptos de disponibilidad, mantenibilidad y confiabilidad del modelo puntual, pero en lugar de utilizar promedios estos utilizan diferentes distribuciones que modelan mucho mejor el comportamiento de las variables CMD en el tiempo y sus parámetros. Estos métodos son muy aceptados para su aplicación tanto a elementos o máquinas reparables o no, además de la posibilidad de aplicación de software que faciliten su aplicación (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 63).



### **2.5.3 Métodos de modelos hpp o nhpp**

Son utilizados para predecir sistemas reparables, ósea aquellos que se puedan reparar al fallar. También son usados los modelos de: Proceso homogéneo de Poisson (HPP) y Proceso no homogéneo de Poisson (NHPP) (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 63).

### **2.5.4 Series temporales**

Se trata de un método de previsión que usa técnicas de series temporales y se basa en la utilización del modelo universal de pronósticos, con sus tres etapas del método científico: análisis previo, lanzamiento de hipótesis, y verificación (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 63).

### **2.5.5 Otros**

Es la combinación de los anteriores u otros, de hecho se pueden combinar dos o más de los anteriores para lograr una modelación predictiva, como también se puede recurrir a otros modelos que tengan un buen grado de validez científica para predecir el comportamiento futuro de las máquinas (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 64).

## **2.6 Distribuciones estadísticas aplicadas al mantenimiento**

Tal como lo explica (López, 2012 pág. 7) las distribuciones de probabilidad son funciones matemáticas teóricas que se utilizan para realizar previsiones, que describen la forma en que se espera que varíen los resultados de un experimento. Por lo tanto, son útiles en mantenimiento debido a que ayudan a tomar decisiones en condiciones de incertidumbre.

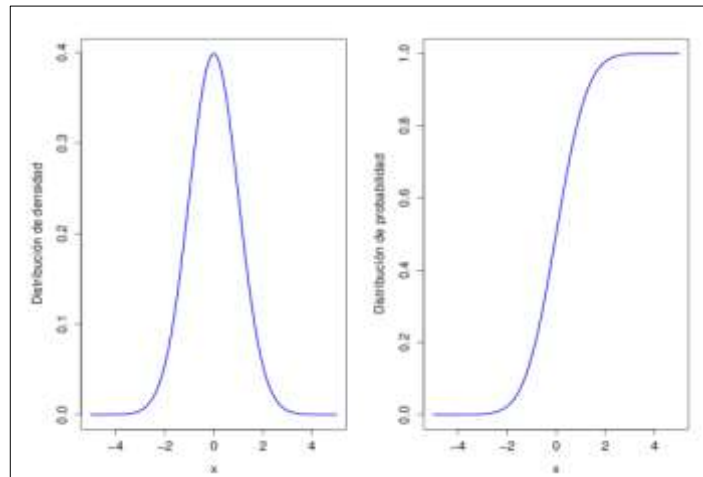
Las distribuciones estadísticas más utilizadas en el campo del mantenimiento son:

- Distribución Normal o de Gauss
- Distribución Lognormal
- Distribución Loglogística
- Distribución Exponencial
- Distribución de Weibull

### **2.6.1 Distribución normal o de gauss**

La distribución normal es una de las distribuciones de probabilidad de variable continua que con más frecuencia aparece aproximada en fenómenos reales.

Según lo explica (López, 2012 pág. 8) la gráfica de su función de densidad tiene una forma acampanada y es simétrica respecto de un determinado parámetro estadístico. Esta curva es conocida como la campana de Gauss véase la Figura 12-2. Esta distribución tiene gran importancia en el ámbito de la estadística ya que permite modelar numerosos fenómenos naturales, sociales y psicológicos.



**Figura 12-2.** Distribución normal con  $\mu=0$  y  $\sigma=1$   
Fuente: (López, 2012)

### 2.6.2 *Distribución lognormal*

Esta distribución estadística es usada comúnmente para variables que muestran valores que tienen una alta tendencia en la que muchos valores ocurren cerca del valor mínimo. Con esta distribución se pueden representar muchas variables físicas y procesos de deterioro (Vergara Rea, 2007 pág. 20).

Debido principalmente a que la distribución normal, una de las más importantes de las distribuciones estadísticas, no resulta muy útil a la hora de modelar tiempos de falla, ya que está considera valores negativos contrastando con el hecho de que los tiempos de falla son siempre valores positivos, la distribución lognormal es usada como una alternativa para solventar esta dificultad gracias a que se deriva de la distribución normal y solo considera valores positivos (Hernández Domínguez, 2010 pág. 12).

Se dice entonces que una variable aleatoria  $T$  tiene un comportamiento lognormal, con parámetros  $\mu$  y  $\sigma$  si su logaritmo es una variable aleatoria con distribución normal, es decir, si (Hernández Domínguez, 2010 pág. 12):

$$\ln(T) \rightarrow N(\mu, \sigma)$$

[ 13 ]

Si  $T$  sigue una distribución lognormal se representa por  $T \sim \ln(\mu, \sigma)$ , donde  $\mu$  y  $\sigma$  son los parámetros de localización y dispersión de la distribución de  $\ln(T)$  (Hernández Domínguez, 2010 pág. 12).

La función de densidad de probabilidad está dada por:

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(\ln t - \mu)^2 / 2\sigma^2} \quad [14]$$

La función de distribución se expresa por:

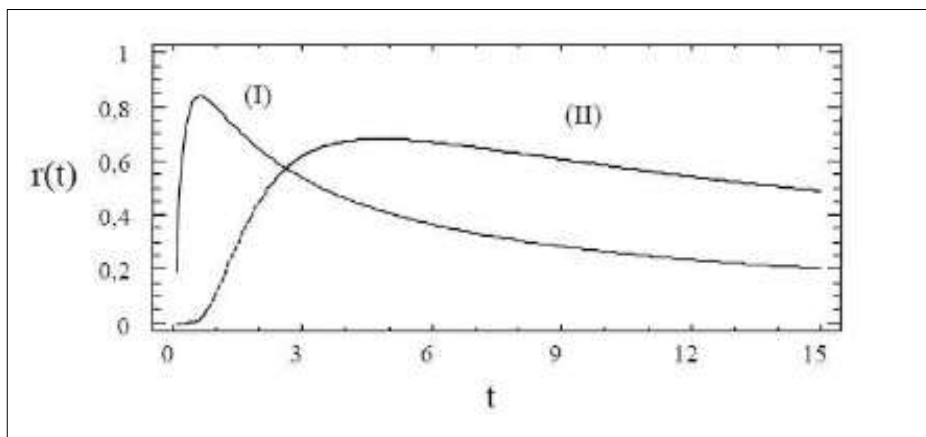
$$F(t) = \Phi\left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right) \quad [15]$$

Donde  $\Phi(\mu)$  es la función de densidad de una Normal (0,1).

La función de fiabilidad o supervivencia es:

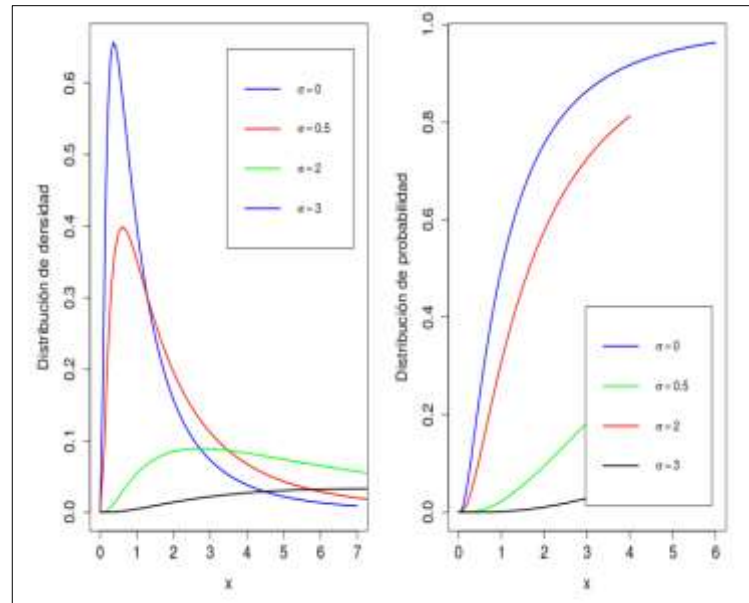
$$R(t) = P(T > t) = 1 - F(t) = P\left(\frac{\ln T - \mu}{\sigma} > \frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right) \quad [16]$$

La función de riesgo  $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$  tiene un valor cero en  $t = 0$ , es creciente hasta un máximo y después decrece lentamente sin llegar a 0 véase la Figura 13-2 (Hernández Domínguez, 2010 pág. 13).



**Figura 13-2.** Razones de fallo de distribuciones lognormales  
Fuente: (Hernández Domínguez, 2010)

De acuerdo a (López, 2012 pág. 9) una variable puede ser modelada como Lognormal si esta puede ser considerada como un producto multiplicativo de muchos pequeños factores independientes.



**Figura 14-2.** Distribución Lognormal con distintos parámetros  $\sigma$ .  
Fuente: (López, 2012)

La distribución Lognormal tiene su tasa de fallo creciente y suele utilizarse para modelar la fiabilidad de componentes estructurales y electrónicos (López, 2012 pág. 10). También es importante al ajustarse a procesos continuos (procesos técnicos) y puede ser una buena representación de la distribución de los tiempos de reparación (Hernández Domínguez, 2010).

### 2.6.3 Distribución loglogística

La distribución loglogística al igual que la distribución lognormal proporcionan modelos para tiempos de vida que no tienen una función de riesgo monótona, sino que pueden presentar diferentes formas. Las funciones de riesgo de estas dos distribuciones son muy parecidas, sin embargo, es destacable que la de la loglogística algebraicamente es mucho más manejable (Hernández Domínguez, 2010 pág. 14).

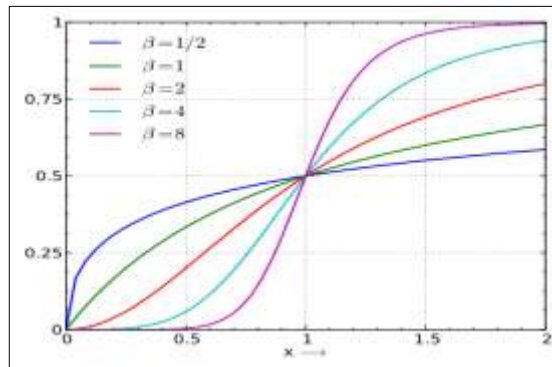
La función de distribución de probabilidad está dada por:

$$F(t; \alpha, \beta) = \frac{1}{1 + \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{-\beta}} \quad \text{cuando } t > 0, \alpha > 0, \beta > 0 \quad [17]$$

Donde:

$\alpha$ : es el parámetro de escala y también es la media de la distribución;  $\alpha > 0$

$\beta$ : es el parámetro de forma;  $\beta > 0$



**Figura 15-2.** Función de distribución de probabilidad loglogística.  
Fuente: (Wikipedia.org, 2008)

La función de densidad de probabilidad se expresa a través de la siguiente ecuación:

$$f(t; \alpha, \beta) = \frac{\left(\frac{\beta}{\alpha}\right) \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}}{\left(1 + \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right)^2} \quad [18]$$

La función de supervivencia o confiabilidad es:

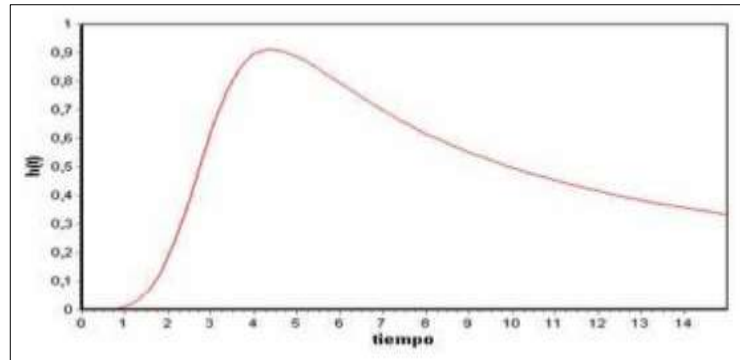
$$R(t) = 1 - F(t) = \left[1 + \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right]^{-1} \quad [19]$$

La función de riesgo es:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\left(\frac{\beta}{\alpha}\right) \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}}{1 + \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad [20]$$

Esto es para  $t \geq 0$ .

En la Figura 16-2, se puede apreciar la función de riesgo de la distribución loglogística que tiene como característica que crece inicialmente y a partir de un momento determinado cambia de sentido y decrece.



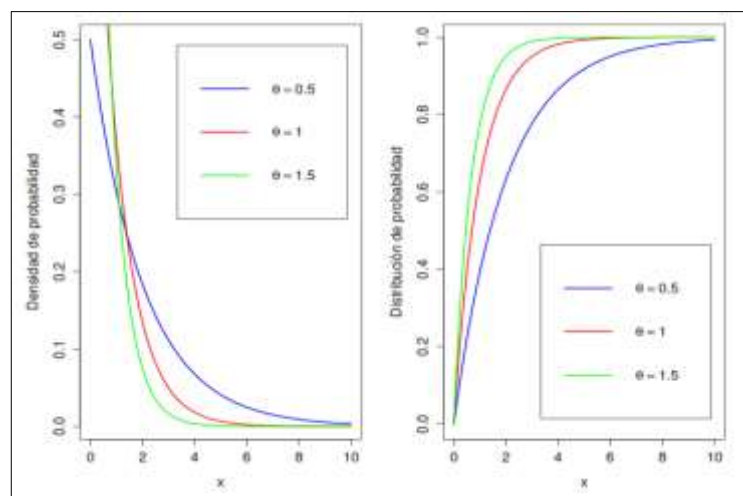
**Figura 16-2.** Función de riesgo de una distribución loglogística.  
Fuente: (Hernández Domínguez, 2010)

#### 2.6.4 Distribución exponencial

La Distribución Exponencial es ampliamente usada en análisis de confiabilidad, como distribución de la variable aleatoria “tiempo entre fallas” de equipos o sistemas. Describe la cantidad de tiempo que transcurre entre eventos (Vergara Rea, 2007 pág. 21).

El motivo de su amplio uso en la modelación de la fiabilidad es que:

- Es sencilla de tratar algebraicamente
- Se considera adecuada para modelar el intervalo de vida funcional del ciclo de vida del dispositivo
- La distribución exponencial aparece cuando la tasa de fallos es constante,  $\lambda(t) = \lambda$  (López, 2012 pág. 12).



**Figura 17-2.** Distribución exponencial para distintos valores de  $\theta$ .  
Fuente: (López, 2012)

Si la tasa de fallos se considera constante, entonces la función de distribución de los fallos es exponencial. Entonces de las propiedades de ésta se deduce que la probabilidad de que

una unidad que está trabajando falle en el próximo instante es independiente de cuánto tiempo ha estado trabajando, lo que implica que la unidad no presenta síntomas de envejecimiento por lo que es igualmente probable que falle en el instante siguiente cuando está nueva o cuando no lo está (López, 2012 pág. 13).

### 2.6.5 *Distribución de weibull*

Según lo explica (Torres, 2010) en su obra:

El modelo probabilístico de Weibull es muy flexible, pues la ley tiene tres parámetros que permiten “ajustar” correctamente toda clase de resultados experimentales y operacionales. Contrariamente al modelo exponencial, la ley de Weibull cubre los casos en que la tasa de fallo  $\lambda$  es variable y permite por tanto ajustarse a los períodos de “juventud” y a las diferentes formas de “envejecimiento” (...).

Para su utilización se precisan los resultados de ensayo de muestras o la toma de datos de funcionamiento (TBF = intervalo entre dos fechas de averías).

Estos resultados permiten estimar la función de repartición  $F(t)$  que corresponde a cada instante  $t$ .

La determinación de los tres parámetros permite, utilizando tablas, evaluar la MTBF y la desviación típica. Por otra parte, el conocimiento del parámetro de forma  $\beta$  es un útil de diagnóstico del tipo de fallo cuando el equipo en estudio es una caja negra. (p.80)

La distribución de Weibull es una distribución continua y triparamétrica, estando completamente definida por tres parámetros lo que la convierte en la distribución más empleada en el campo de la Fiabilidad (López, 2012 pág. 14).

En fiabilidad, dentro de la literatura técnica está muy extendida la distribución de Weibull biparamétrica  $(\beta, \eta)$ , siendo el tercer parámetro el de localización, el cual es el parámetro que localiza la abscisa a partir del cual se inicia la distribución  $(\beta, \eta, \gamma)$ , llegando a ser una distribución triparamétrica mucho más exacta ya que al trabajar con la forma biparamétrica se asume un error en el estudio (López, 2012 pág. 14).

#### 2.6.5.1 *Expresiones matemáticas de la distribución de Weibull*

Sea la variable aleatoria continua  $t$ , distribuida de acuerdo con la ley de Weibull, se tiene la distribución de **Densidad de probabilidad** de una variable aleatoria definida por (López, 2012 pág. 15):

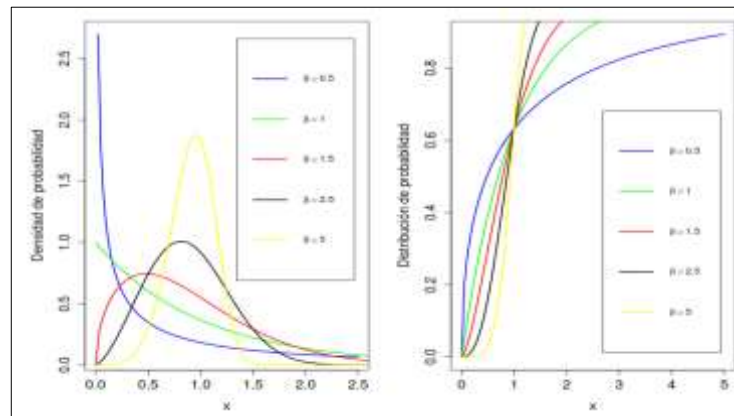
$$f(t; \eta, \beta, \gamma) = \left\{ \frac{\beta}{\eta} * \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} * e^{-\left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta} \right. \text{siendo } t \geq 0 \quad [ 21 ]$$

Donde:

$\beta$ : se llama parámetro de forma;  $\beta > 0$

$\eta$ : se llama parámetro de escala o característica de vida;  $\eta > 0$

$\gamma$ : se llama parámetro de posición o de localización de la distribución;  $-\infty < \gamma < +\infty$



**Figura 18-2.** Distribución de Weibull para distintos valores de  $\beta$ .  
Fuente: (López, 2012)

La distribución de Weibull modela la distribución de fallos (en sistemas) cuando la tasa de fallos es proporcional a una potencia del tiempo:

- Un valor de  $\beta < 1$  indica que la tasa de fallos decrece con el tiempo.
- Cuando  $\beta = 1$ , la tasa de fallos es constante en el tiempo.
- Un valor  $\beta > 1$  indica que la tasa de fallos crece con el tiempo.

La **Función de distribución** de probabilidad  $F(x)$  (Infiabilidad) es:

$$F(t; \eta, \beta, \gamma) = 1 - e^{-\left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad [ 22 ]$$

Esto es para valores de  $t \geq 0$ , y es nula en  $t < 0$ . Véase en la Figura 18-2, la variación de la función de densidad de probabilidad y de distribución de probabilidad para distintos valores de  $\beta$  (López, 2012 pág. 15).

La función de la **Fiabilidad** correspondiente  $R(t)$  es por tanto  $R(t) = 1 - F(t)$

Pudiendo ser expresada también por la expresión (López, 2012 pág. 16):



$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad [23]$$

La **Esperanza matemática o media**, en este caso el MTBF está dado por:

$$E(t) = \text{Media} = \text{MTBF} = \gamma + \eta * \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad [24]$$

Donde  $\Gamma(\dots)$  corresponde a la función Gamma (López, 2012 pág. 16).

La **Tasa de fallo** está dada por:

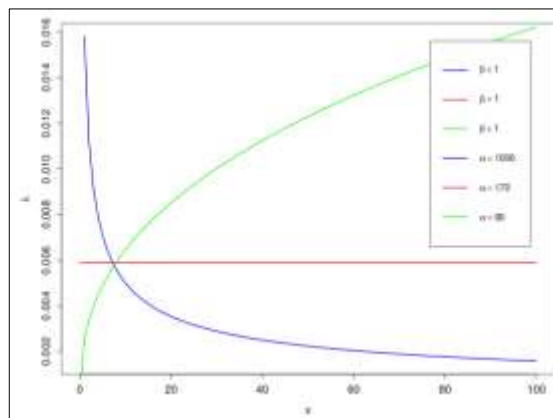
$$\lambda(t; \eta, \beta, \gamma) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad [25]$$

En la Figura 19-2, se puede apreciar la variación de la tasa de fallo  $\lambda$  para distintos valores de  $\eta$  y  $\beta$  (López, 2012 pág. 16).

### 2.6.5.2 Características de la distribución de Weibull

La aplicación de la distribución de Weibull permite conocer:

- El tipo de mecanismos de fallo que ha sido causante del mismo
- Cantidad de fallos que se pueden esperar en un futuro
- Fiabilidad de un equipo existente.



**Figura 19-2.** Tasa de fallo en la distribución de weibull.  
FUENTE: (López, 2012)

Es así que el tipo de fallos que se pueden dar se puede conocer a través de la determinación del parámetro  $\beta$ , en este caso se tiene para (López, 2012 pág. 17):

- $0 < \beta < 1$ , el sistema se encuentra en la etapa de mortalidad infantil o período de juventud (rodaje, desarrollo), la tasa de fallo decrece.
- $\beta = 1$ , la tasa de fallo es constante, y se puede tener:

- Fallos aleatorios independientes del tiempo
  - Errores humanos
  - Errores de mantenimiento
  - Sistemas de varios componentes
  - Combinación de dos o tres modos de fallos diferentes.
- $1 < \beta < 4$ , la tasa de fallo es creciente, lo que indica que se encuentra en una fase de obsolescencia la cual se puede analizar detalladamente para orientar el diagnóstico:
    - $1.5 < \beta < 2.5$ , indica un fenómeno de fatiga
    - Con  $\beta = 2.5$  hasta  $\beta = 4$ , indica fatiga de baja frecuencia
    - Con  $\beta = 2$ , se puede tener fallos en rodamiento de bolas
    - Un  $\beta = 1.5$ , indica fallos en rodamientos de rodillos
    - $3 < \beta < 4$ , un fenómeno de corrosión (iniciado en el tiempo  $t = \gamma$ ), de sobrepasar un umbral (campo de deformación plástica).
    - Un  $\beta = 3.5$ , indica que  $f(t)$  es simétrica, y la distribución es “normal”

Mientras que el material electrónico demuestra una larga fase de vida a  $\lambda$  constante, el material electromecánico, a causa de los fenómenos de desgaste, no muestra aplanamientos en la “curva de la bañera” y debe por tanto ser modelizado por la ley de Weibull (Torres, 2010 págs. 81-82).

## 2.7 Curva de la bañera o de davies

Como lo explica (Mora Gutiérrez, 2009):

Las diferentes acciones que se deciden sobre las tareas que se deben realizar por parte de mantenimiento (y producción), dependen entre otros parámetros de la curva de la bañera o de Davies (Ebeling, 2005), donde se muestra la evolución en el tiempo frente a la tasa de fallas  $\lambda(t)$  y el valor del parámetro de forma Beta del equipo que se evalúa.

De acuerdo con el valor del equipo para ese momento, se selecciona si las tareas de mantenimiento deben ser correctivas, modificativas, preventivas o predictivas, al tener en cuenta la fase en que se encuentre el elemento o sistema. (p.107)

La forma de la curva de la bañera se puede apreciar en la Figura 20-2, y tal como se puede observar en la fase I, la tasa de fallas es decreciente, ya que a medida de que pasa el tiempo la probabilidad de que ocurra una falla disminuye, normalmente en esta fase existe

un proceso conocido como asentamiento o de acondicionamiento inicial, normalmente las fallas se solucionan mediante acciones de tipo correctivo y modificativo (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 107).

Si las fallas son recurrentes, la aplicación de la metodología análisis de fallas FMECA es adecuada para lograr su eliminación ya sea a través de acciones correctivas o modificativas (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 107).

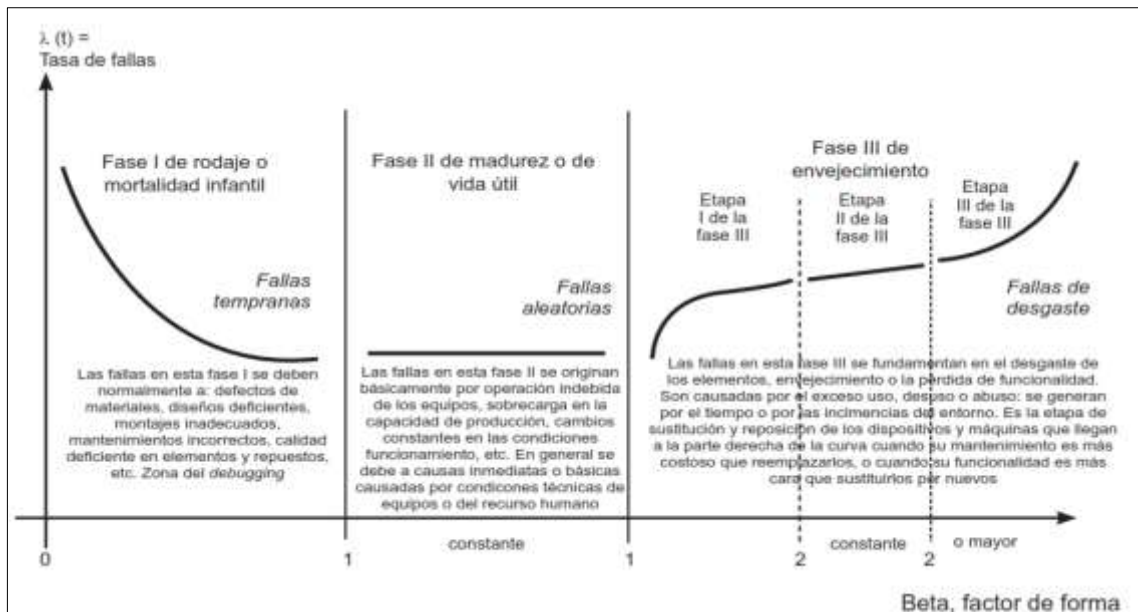
Además (Mora Gutiérrez, 2009) manifiesta que:

La fase II se tipifica por fallas enmarcadas en origen técnico, ya sea de procedimientos humanos o de equipos. Las acciones que más se adaptan a esta etapa son de las modificativas, ya que al generarse por utilizaciones fuera del estándar (de equipos o de personas), se requiere modificar esos equipos y/o procesos, dentro de nuevos estándares, mediante técnicas modificativas, cuando las fallas son esporádicas o recurrentes; en el caso de ser fallas crónicas se actúa con FMECA y acciones modificativas.

La probabilidad de falla en la fase II es constante, indiferente del tiempo que transcurra; por ejemplo, si se tienen dos elementos similares y a uno de ellos se le acaba de hacer un mantenimiento o reparación, mientras al otro desde hace algunos años no se le realizan tareas de mantenimiento, en el instante actual ambos tienen la misma probabilidad de sufrir una falla. (p. 107)

En la fase III se observa un incremento paulatino de la tasa de fallas en la medida en que aumenta el tiempo hacia la derecha, en esta fase se pueden diferenciar 3 ciclos:

- En el ciclo I de la fase III, la tasa de fallas aumenta suavemente; las fallas que normalmente aparecen son conocidas y se deben a los efectos del tiempo por causas de uso, abuso o desuso. Debido a que las fallas son conocidas y se tiene algún control sobre ellas se pueden utilizar acciones planeadas preventivas (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 107).
- En el ciclo II de la fase III, se puede apreciar en la Figura 20-2, el incremento de la tasa de fallas en forma constante y con pendiente positiva en forma rectilínea, en esta etapa se comienza el uso de las acciones predictivas y el comportamiento de las fallas se vuelve predecible, normalmente en esta etapa se consigue implementar las acciones preventivas de una forma sólida (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 107).



**Figura 20-2.** Curva de la bañera o de Davies.

FUENTE: (Mora Gutiérrez, 2009)

- Finalmente se tiene el ciclo III de la fase III, y es la zona de envejecimiento puro, la vida útil del activo se acelera y la tasa de fallos se incrementa aceleradamente. El uso de actividades predictivas se estabiliza pero si estas ya no mejoran la mantenibilidad del activo la única solución es la reposición o sustitución (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 108).

Durante la etapa III de la fase III, es común aún utilizar técnicas preventivas, correctivas y modificativas, ya que la mayoría de las fallas son producidas por la acción del tiempo, mientras que las acciones predictivas se utilizan para tipificar el comportamiento futuro de los elementos y lograr conocer su verdadera vida útil en tiempo presente (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 108).

## 2.8 Gestión del mantenimiento

De acuerdo a (Placencia Urrutia, 2014) la norma EN13306 define a la gestión de mantenimiento como:

**Gestión del mantenimiento:** 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. (p.12)

En este contexto, se puede manifestar que la gestión del mantenimiento es un trabajo de planificación, control y supervisión, el cual debe ser realizado para asegurar la disponibilidad y efectividad de una infraestructura requerida, o conjunto de activos que constituyan el sistema de producción de una empresa (Márquez, 2010 pág. 3).

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 pág. 3).

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 Gutiérrez, 2009 pág. 36), 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.

### ***2.8.1 Etapas de la gestión de mantenimiento***

Para lograr una efectiva gestión de mantenimiento, se deben ejecutar ciertas etapas, las cuales deben ser cubiertas para que el modelo de gestión pueda cumplir con su misión, estas son:

- Planificación
- Programación
- Ejecución
- Supervisión y control

#### ***2.8.1.1 Planificación***

La etapa de planificación se enfoca en la definición de rutinas y procedimientos y en la elaboración de planes detallados considerando tiempos relativamente cortos o medianos, usualmente mensuales o trimestrales, por lo que se hace necesario la determinación de las operaciones necesarias, mano de obra requerida, materiales a emplear, equipos a utilizar y duración de las actividades (Rodríguez del Águila, 2012 pág. 27).

En este proceso se asegura la existencia de una estructura organizada de planes preventivos o correctivos que estén alineados con las reales necesidades de los equipos. La planificación es una forma organizada de administrar el trabajo de mejora (UNEFA, 2011 pág. 15).

Durante la etapa de planificación se deben considerar los siguientes aspectos:

- Tener establecidos los objetivos y metas en cuanto a los objetos a mantener.
- Garantizar la disponibilidad de los equipos o sistemas.
- El establecimiento de un orden de prioridades para la ejecución de las acciones de mantenimiento.
- Un sistema de señalización y codificación lógica
- Inventario técnico
- Procedimientos y rutinas de mantenimiento
- Registros de fallas
- Estadísticas de tiempo de parada y tiempo de reparación (Rodríguez del Águila, 2012 págs. 27-28).

#### *2.8.1.2 Programación*

En esta etapa se realiza la organización para la ejecución de las actividades de mantenimiento definidas en la etapa de planificación, la etapa de programación es más específica que la etapa de planificación ya que se encarga de designar cuándo, con quién y con qué hacer una actividad de mantenimiento (UNEFA, 2011 pág. 15).

En esta etapa se establecen las frecuencias para las asignaciones del mantenimiento preventivo, lo cual es esencial para que exista una continua disponibilidad de los equipos e instalaciones (Rodríguez del Águila, 2012 pág. 28).

#### *2.8.1.3 Ejecución*

La etapa de ejecución del mantenimiento es una de las más desarrolladas dentro de una empresa, por lo que es muy importante el tratar de sistematizarla para conseguir hacerla lo menos dependiente de las personas, esto generalmente es resultado de la falta de documentación de las actividades y la capacitación inadecuada del personal dando como resultado que la empresa se vuelva vulnerable, así como dependiente de las personas y de la tecnología (UNEFA, 2011 pág. 15).

Para lograr que el proceso sea eficiente, es importante el realizar una documentación adecuada y oportuna, así como el manejo de manuales y el cumplimiento de especificaciones de seguridad, entre otros ayudará a minimizar las posibilidades de error y a garantizar el éxito de la etapa de ejecución (UNEFA, 2011 pág. 15).

#### *2.8.1.4 Supervisión y control*

En esta etapa de la gestión de mantenimiento, se puede determinar la calidad del mantenimiento efectuado ya que dentro de las etapas anteriores se pueden medir y evaluar la gestión a través de la citación de diferentes índices (Intervención, defectos, fuerzas de trabajo, etc.), su determinación va a permitir analizar el desenvolvimiento del sistema aplicado, facilitando así la posterior corrección de las deficiencias del sistema aplicado (UNEFA, 2011 pág. 15).

Tanto la etapa de ejecución, control y evaluación, vinculan dos acciones administrativas de singular importancia tales como la dirección y la coordinación de los esfuerzos del grupo de realizadores de las actividades generadas en los procesos de planificación y programación tendientes a la consecución de los objetivos propuestos (Rodríguez del Águila, 2012 pág. 28).

En general la ejecución, el control y la evaluación, permiten que las actividades se realicen tal cual fueron planificadas, los resultados deben ser evaluados de tal forma que se logre la retroalimentación del proceso inicial (Rodríguez del Águila, 2012 pág. 28).

## CAPÍTULO III

### 3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1 Metodología

##### 3.1.1 *Tipo de estudio*

Los tipos de estudio que se realizan en la presente investigación son los siguientes:

**Descriptiva.** - Ya que se describe la situación prevaleciente en el momento de realizar el estudio, mediante la utilización de datos que determinan el comportamiento de las locomotoras.

**Evaluativa.** - Debido a que se realiza la evaluación de los índices de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de las 8 locomotoras en estudio y se contrasta estos resultados con la valoración del estado actual de la gestión de mantenimiento en los talleres de FEED.

**De campo.** - Se realizaron visitas técnicas al taller de FEED filial sur, con el objetivo de familiarizarse con la situación actual sin manipular o controlar variable alguna.

**Aplicada.** - Ya que, al término del presente trabajo de investigación, se contará con una propuesta de mejora al modelo actual de gestión de mantenimiento para las locomotoras tipo BBB 2400, la cual posteriormente puede ser aplicada por la FEED, no solo para las locomotoras diésel eléctricas sino también para el resto de los activos de la empresa.

##### 3.1.2 *Diseño de la investigación*

El diseño de la presente investigación es de tipo no experimental, es sistemática y empírica ya que se realiza sin manipular intencionalmente la variable independiente. En el presente estudio se evalúa el sistema de gestión actual de mantenimiento, sin intervenir en su desarrollo analizando y describiendo los indicadores CMD de mantenimiento obtenidos de las locomotoras tipo BBB 2400 y que son resultado de la aplicación del sistema de gestión actual de mantenimiento para la posterior comprobación de la hipótesis.



### 3.1.3 *Métodos, instrumentos y técnicas*

En el presente trabajo se aplica el método científico, el cual se basa en que sigue una sucesión ordenada de fases en la investigación, tiene un nivel de desglose muy importante y además es muy flexible.

El método científico es 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.

La aplicación ordenada del método científico contribuye a la consecución de los objetivos planteados en el proyecto:

- Realizar un estudio del arte sobre el análisis de indicadores de mantenimiento aplicados a la industria ferroviaria.
- Desarrollar una metodología que permita obtener la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de las locomotoras tipo BBB2400 a partir de la información disponible.
- Identificar las unidades y sistemas críticos de la locomotora tipo BBB 2400 que influyan en los indicadores de mantenimiento.
- Optimizar el plan de mantenimiento de las locomotoras tipo BBB 2400.
- Proponer una metodología para llevar el control de los indicadores de mantenimiento en las locomotoras tipo BBB2400.

Las técnicas que se utilizarán son cualitativas, cuantitativas y técnicas Modernas de Ingeniería de Mantenimiento, cuantitativas debido a que se realiza un análisis de los datos obtenidos de las siguientes fuentes:

- Registro e histórico de fallas
- Registros de mantenimiento

A partir del diseño de una metodología para el tratamiento de los datos y la obtención de los índices de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, la información es analizada

y se obtienen lineamientos que permiten generar estrategias de mejora aplicables a la gestión del mantenimiento de las locomotoras de FEEP.

Cualitativas en función de que se determina cuáles son los aspectos del actual modelo de gestión de mantenimiento que influyen positiva o negativamente en los resultados obtenidos en los indicadores de mantenimiento.

#### *3.1.3.1 Método inductivo*

En la presente investigación se utiliza el método inductivo, ya que se procede a la recolección de los datos, la categorización de variables, la prueba de hipótesis, y la comprobación de la relación de las variables.

#### *3.1.3.2 Método analítico*

En esta investigación se aplica el método analítico, esto debido a que este método consiste en revisar o analizar de forma ordenada los datos proporcionados por los talleres de mantenimiento de FEEP, logrando filtrar los datos útiles para el cálculo y modelación probabilística de los indicadores CMD y su posterior análisis.

#### *3.1.3.3 Método correlacional*

En la presente investigación se utiliza el método correlacional ya que no se considera una variable independiente experimental y se basa en la observación y el análisis para posteriormente probar la hipótesis.

#### *3.1.3.4 Valoración del estado actual de la gestión de mantenimiento aplicada en los talleres de las filiales de FEEP*

Para la evaluación del estado actual de la gestión de mantenimiento aplicada en los talleres de FEEP, se ha diseñado una encuesta dirigida a los jefes de taller 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 ofrece FEEP en el Ecuador, las filiales evaluadas son las siguientes:

- Filial sur
- Filial Centro
- Filial Litoral

- Filial Norte

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:

- Área I: Organización del Mantenimiento de las locomotoras
- Área II: Planificación del mantenimiento de las locomotoras
- Área III: Mantenimiento programado
- Área IV: Mantenimiento preventivo
- Área V: Mantenimiento por avería (Correctivo)

### *3.1.3.5 Metodología para la medición de CMD*

Para la obtención de los resultados de los indicadores de confiabilidad se analizarán los datos provistos en los históricos de falla y mantenimiento de acuerdo a la siguiente metodología y con la ayuda de los programas informáticos Microsoft Excel, Statgraphics Centurion XVI, y Minitab 17.

La metodología que se seguirá se basa en el modelo universal para pronosticar CMD propuesto por (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 68) y ha sido optimado para ser aplicado con el software antes citado, véase la Figura 1-3.

La metodología a utilizar se expone a continuación:

#### **Primera etapa: obtención de los datos**

Esta etapa se refiere a la obtención de los datos los cuales se obtienen de históricos de falla y mantenimiento, corresponden a tiempos útiles, fallas, reparaciones y mantenimiento.

#### **Segunda etapa: preparación de los datos**

Se procederá a analizar los datos obtenidos para determinar datos de fallas, reparaciones, tiempos útiles, mantenimientos, etc., de acuerdo a estos datos se podrá elegir cuál es la disponibilidad factible de usar y de los requerimientos específicos de cálculo. En esta fase se separa lo correctivo de lo planeado.

### **Tercera etapa: elección de la disponibilidad factible de calcular o deseada de utilizar**

A partir de los datos obtenidos en la fase anterior se escoge la disponibilidad factible de utilizar de entre las siguientes opciones:

- Disponibilidad Genérica o de Steady-state
- Disponibilidad Inherente o intrínseca
- Disponibilidad alcanzada
- Disponibilidad Operacional
- Disponibilidad Operacional Generalizada

### **Cuarta etapa: Análisis de Weibull**

En esta fase se debe tomar la decisión de utilizar el método de máxima verosimilitud o si se utiliza el método de alineación de mínimos cuadrados para el ajuste de los datos a la alineación con la función de Weibull (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 73).

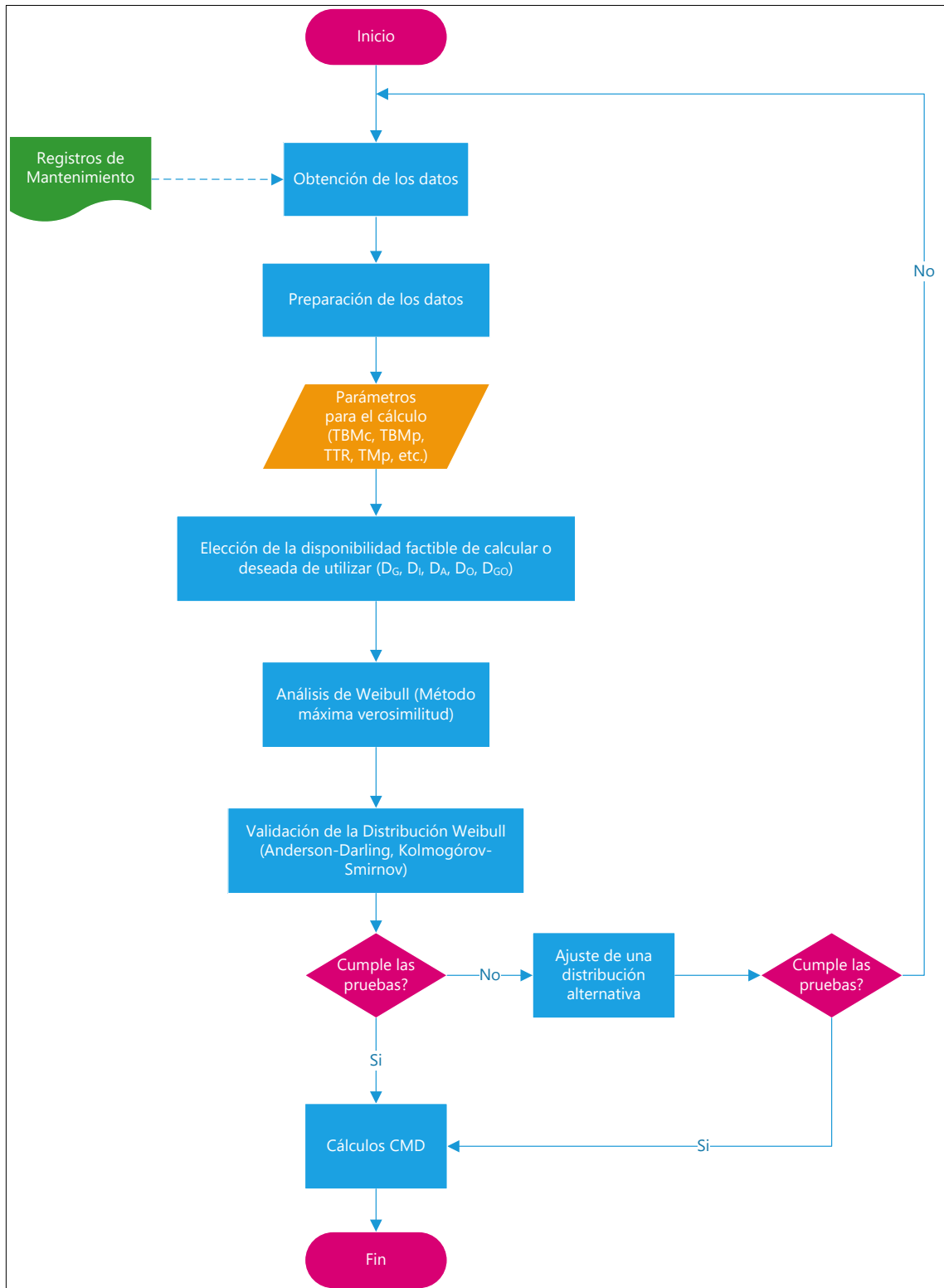
En el método de mínimos cuadrados las estimaciones de los cuadrados mínimos se calculan al ajustar una línea de regresión a los puntos de un conjunto de datos que tiene la suma mínima de las desviaciones elevada al cuadrado (error del cuadrado mínimo). En un análisis de confiabilidad, esta información se grafica en una gráfica de probabilidad, lo cual puede facilitar la interpretación (Minitab, 2015).

La función de verosimilitud indica la probabilidad de que una muestra observada sea una función de valores de parámetros posibles. Por lo tanto, cuando se maximiza la función de verosimilitud se determina los parámetros que tienen mayor probabilidad de producir los datos observados. 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). Se ha elegido utilizar el método de máxima verosimilitud dada la cantidad de datos obtenidos del histórico de falla y a la flexibilidad del software estadístico elegido para la presente investigación.

### **Quinta etapa: Validación de la distribución de Weibull o ajuste de una distribución alternativa**

La metodología propuesta tiene la ventaja de que desde el inicio utiliza la metodología de Weibull que sirve para las 3 etapas de la curva de Davies, sin embargo, para asegurar que

el ajuste sea bueno los resultados deben cumplir las pruebas de bondad de ajuste, estas pruebas serán ejecutadas en Statgraphics.



**Figura 1-3.** Metodología utilizada para la medición CMD de las locomotoras de FEEP.  
Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

En la presente investigación se usará las siguientes pruebas para validar la bondad de ajuste:

- Kolmogórov-Smirnov
- Anderson-Darling

Si no se cumplen estas pruebas entonces se debe probar con otra distribución alternativa utilizada en fiabilidad diferente a la de Weibull y que cumpla con las pruebas de bondad de ajuste especificadas.

### **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 y que serán analizados posteriormente.

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 alcanzada.

#### *3.1.3.6 Técnicas*

Para el desarrollo de la investigación se utiliza para la recolección de la información los históricos de fallas de las locomotoras tipo BBB 2400 provistos por FEPP, una vez adquirida la información se procede a su análisis usando técnicas modernas de la ingeniería de mantenimiento para la obtención de los indicadores CMD, además se utiliza un instrumento de evaluación a través de una encuesta para la valoración del sistema actual de gestión de mantenimiento de las locomotoras.

Posterior a la recolección de la información se procede al ordenamiento de los datos y proceder con el tratamiento de los datos para obtener los resultados que indiquen la situación actual del modelo de mantenimiento.

#### *3.1.3.7 Instrumentos*

Para la aplicación del cuestionario y la recolección de la información utilizada para la evaluación de la gestión de mantenimiento de los talleres de FEPP se utilizó la plataforma de Google forms, ya que se requería realizar la evaluación del proceso de mantenimiento

llevado a cabo en las locomotoras por parte de las cuatro filiales las cuales se encuentran ubicadas en cuatro ubicaciones geográficas distantes en el Ecuador.

Los historiales de falla fueron concedidos por los talleres de FEPP en formato digital bajo la plataforma de almacenamiento en la nube de Dropbox y formato Excel y el posterior tratamiento de los datos del histórico de fallas se lo realizó mediante la aplicación de la metodología para la medición de CMD y el uso del software Excel, Statgraphichs y Minitab, los cuales validaron el ajuste de los datos y proveyeron los datos para el cálculo de CMD y la posterior contrastación de la hipótesis.

### **3.2 Delimitación**

El presente trabajo se llevará a cabo en los talleres de FEPP ubicados en la filial sur la cual funciona en la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo; a partir de aquí se receipta además información correspondiente enviada por las otras filiales referentes al mantenimiento de las locomotoras asignadas a ellas, logrando de esta manera la evaluación de la gestión de mantenimiento de las 8 locomotoras tipo BBB 2400 que actualmente se encuentran en operación en el país.

### **3.3 Población**

La población considerada para la presente investigación serán las ocho locomotoras Gec Alsthom tipo BBB 2400 de Ferrocarriles del Ecuador Empresa Pública, las cuáles operaron durante el año 2015 en las rutas de ferrocarril del Ecuador.

### **3.4 Cronograma**

El presente trabajo se realizó de acuerdo al cronograma que se muestra en la Tabla 1-3, en él se puede apreciar que la investigación fue realizada en 7 meses y se cumplieron 7 etapas.

**Tabla 1-3:** Cronograma de actividades para la ejecución de la investigación.

Etapas	Mes	1				2				3				4				5				6				7			
	Duración en semanas	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Problematización	4	■	■	■	■																								
Marco de referencia	4					■	■	■	■																				
Diseño de la investigación: Marco metodológico	4									■	■	■	■																
Recolección de Datos	3													■	■	■													
Análisis, interpretación y presentación de resultados	5																■	■	■	■	■								
Elaboración y discusión del informe	4																				■	■	■	■					
Impresión y presentación del trabajo final	4																								■	■	■	■	

Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.



## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Obtención de resultados

##### 4.1.1 *Hipótesis general*

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.

##### 4.1.2 *Operacionalización de variables*

###### 4.1.2.1 *Operacionalización conceptual*

**Tabla 1-4:** Operacionalización conceptual de variables.

VARIABLES	CONCEPTO
<p><b>Variable independiente:</b> Estado actual de la Gestión de Mantenimiento aplicada a las locomotoras tipo BBB 2400</p>	<p>En la presente investigación se entenderá por estado actual de la Gestión de Mantenimiento aplicada a las locomotoras tipo BBB 2400, al resultado de realizar una evaluación a la Gestión de mantenimiento aplicada en los talleres de FEED y que se refiere al conjunto de actividades de planificación, control y supervisión de las actividades de mantenimiento, las cuáles deben ser realizadas para asegurar la disponibilidad de las locomotoras tipo BBB 2400 de FEED.</p>
<p><b>Variable dependiente:</b> Disponibilidad de las locomotoras tipo BBB 2400 de FEED</p>	<p>En la presente investigación se entenderá como disponibilidad a la probabilidad expresada en porcentaje de que las locomotoras tipo BBB 2400 de FEED, funcionen satisfactoriamente en el momento en que sean requeridas.</p>

Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

###### 4.1.2.2 *Operacionalización metodológica de variables*

**Tabla 2-4:** Operacionalización metodológica de variables.

VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES
<p><b>Variable independiente:</b> Estado actual de la Gestión de Mantenimiento aplicada a las locomotoras tipo BBB 2400.</p>	<p>1. Organización del Mantenimiento para las locomotoras de FEED</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Funciones y responsabilidades de la función mantenimiento</li> <li>• Autoridad y autonomía de la organización de mantenimiento en el taller</li> </ul>

	<p>2. Planificación de Mantenimiento</p> <p>3. Mantenimiento Programado</p> <p>4. Mantenimiento Preventivo</p> <p>5. Mantenimiento por Avería</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema de información manejado en el taller</li> <li>• Objetivos y metas</li> <li>• Políticas para la planificación</li> <li>• Control de Evaluación</li> <li>• Planificación del mantenimiento programado</li> <li>• Programación e implantación del mantenimiento programado</li> <li>• Control y evaluación del mantenimiento programado</li> <li>• Determinación de parámetros para el mantenimiento preventivo</li> <li>• Planificación del mantenimiento preventivo</li> <li>• Programación e implantación del mantenimiento preventivo</li> <li>• Control y Evaluación del mantenimiento preventivo</li> <li>• Atención a las fallas</li> <li>• Supervisión y ejecución</li> </ul>
<p><b>Variable dependiente:</b> Disponibilidad de las locomotoras tipo BBB 2400 de FEED</p>	<p>1. Análisis CMD</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Confiabilidad</li> <li>• Mantenibilidad</li> <li>• MTBM</li> <li>• <math>\bar{M}</math></li> <li>• Disponibilidad alcanzada</li> </ul>

Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

### 4.1.3 Comprobación de la hipótesis de investigación

#### 4.1.3.1 Determinación de variables

**1:** Estado actual de la Gestión de Mantenimiento aplicada a las locomotoras tipo BBB 2400. La información que se obtuvo para observar el comportamiento de esta variable es resultado de la aplicación de la encuesta para la determinación del estado actual de la

Gestión de Mantenimiento aplicada a las locomotoras tipo BBB 2400 y que se muestra en el Anexo A.

2: Disponibilidad de las locomotoras tipo BBB 2400 de FEEP, la información de esta variable se obtiene de realizar el análisis CMD, a través de la metodología para predicción de CMD propuesta.

#### 4.1.4 Determinación de la población

El estudio se realiza en las filiales de FEEP, en la Figura 1-4 se puede apreciar el organigrama en el cuál se encuentran ubicadas dentro de la estructura organizacional de la empresa.



**Figura 1-4.** Estructura organizacional de FEEP.

Fuente: (FEEP, 2014)

Cada filial tiene su taller de mantenimiento y a cada uno de ellos se les ha asignado una flota de locomotoras encargadas de cumplir con las rutas establecidas por FEEP en el país. En la Tabla 3-4 se muestra la asignación de las locomotoras a cada una de las filiales.

**Tabla 3-4:** Distribución de las locomotoras diésel eléctricas en las filiales de FEEP

Filial de FEEP	Locomotoras asignadas (Codificación)
Filial Sur	2404 2405 2407
Filial Centro	2409 2408 2403
Filial Litoral	2406
Filial Norte	2402

Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

Fuente: (FEEP, 2014)

De acuerdo a la organización establecida se realizará entonces la determinación del estado actual de la gestión de mantenimiento aplicada en los cuatro talleres de las filiales mediante la encuesta pertinente; diseñada para el efecto y dirigida a los jefes de taller y encargados de locomotora.

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.

#### **4.1.5 *Recolección de datos***

La recolección de datos se realizó previo a la solicitud de autorización por escrito por parte del investigador a la Gerencia General de Ferrocarriles del Ecuador Empresa Pública ubicada en la ciudad de Quito. La información recabada son los historiales de mantenimiento de las locomotoras, documentos técnicos y manuales de las locomotoras y los resultados de las encuestas realizadas al personal que labora en las cuatro filiales.

#### **4.1.6 *Medición y análisis cmd en las locomotoras***

La medición y análisis de CMD en las locomotoras parte de la aplicación de la metodología elegida en el capítulo 3, se detalla el proceso seguido a continuación:

##### **Primera etapa: Obtención de los datos**

Los datos fueron obtenidos de los documentos denominados “registros cronológicos de órdenes de trabajo” en formato digital, estos fueron obtenidos del sitio de almacenamiento en Dropbox previa autorización de la gerencia general y la entrega de la clave de la cuenta por parte del departamento de mantenimiento. Los archivos digitales en formato hoja de cálculo “.xlsx” corresponden al historial de mantenimiento de cada una de las 8 locomotoras durante el año 2015.

##### **Segunda etapa: Preparación de los datos**

En este apartado se procedió al análisis de los datos y a la determinación de datos de fallas, y reparaciones creando además hojas de cálculo que permitan manejar adecuadamente la información ordenándola por taller, locomotora y por fecha.

Se consiguió además separar la información correspondiente a mantenimientos correctivos como también la concerniente a los mantenimientos planeados.

Los datos obtenidos corresponden a TBMc (Tiempo entre mantenimiento correctivo), y TTR (tiempo para reparar) correspondientes al análisis integral de la flota de locomotoras de FEEP durante el año 2015 y el primer trimestre de 2016 tal como se puede apreciar en la Tabla 4-4.

**Tabla 4-4:** 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

**Realizado por:** Ing. Luis F. Buenaño M.

**Fuente:** (FEEP, 2014)

De la misma forma se ha logrado obtener los datos correspondientes a los mantenimientos planeados los cuales registran además los tiempos invertidos en la realización de las tareas de mantenimiento planeado por parte de la organización de mantenimiento.

Los tiempos obtenidos son los correspondientes a TBMp (Tiempo entre mantenimiento planeado o preventivo) y TMp (Mantenimiento preventivo que representa el tiempo invertido en la ejecución de la tarea de mantenimiento). Puede apreciarse un extracto de los datos obtenidos en la Tabla 5-4.

El cálculo adecuado de los tiempos de ocurrencia de los sucesos de mantenimiento tanto correctivo como preventivo, garantiza que se pueda elegir el medir una disponibilidad adecuada que logre representar la verdadera situación en cuanto a los logros de mantenimiento en los talleres de FEEP, en las ocho locomotoras en estudio.

Para asegurar que la determinación de los indicadores de CMD sea real, se ha utilizado los datos del horómetro de las locomotoras, el cual es un dato refleja exactamente las

horas de funcionamiento real de los activos y la periodicidad de la ejecución de mantenimientos preventivos y correctivos en el período de análisis especificado.

**Tabla 5-4:** TBMp y TMp obtenidos del tratamiento de datos de los registros de mantenimiento.

FECHA	TBMp (h)	TMp (h)
5/1/2015	29,7	11,5
13/1/2015	38,4	4
20/1/2015	14,2	3
24/1/2015	25,5	3,5
26/1/2015	9,9	4
27/1/2015	9,6	4,5
31/1/2015	29,2	3,5
5/1/2015	49	2,25
8/1/2015	10	7,25
14/1/2015	13	3
20/1/2015	36	2,75
23/1/2015	7	9,5
27/1/2015	14	3
19/1/2015	65,7	13,75
26/1/2015	45,8	4,25
5/1/2015	69	4
12/1/2015	25	3,75
19/1/2015	31	3,75
26/1/2015	38	4,5
19/1/2015	41	3
26/1/2015	45	2,75
5/1/2015	3	113,5
13/1/2015	35	2,9
20/1/2015	29	4,33333333
27/1/2015	36	6,56666667

Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

Fuente: (FEEP, 2014)

### **Tercera etapa: Elección de la disponibilidad factible de calcular o deseada de utilizar**

La disponibilidad elegida para el presente estudio es la Disponibilidad alcanzada; esto debido a que esta tiene en cuenta tanto las reparaciones correctivas como los tiempos invertidos en mantenimientos preventivos, y en razón de que los históricos de mantenimiento provistos cuentan con la información de la ejecución de estos tipos de mantenimiento.

Se debe mencionar que en la disponibilidad alcanzada no se incluye los tiempos logísticos ni los tiempos administrativos, ni otros tiempos de demora, siendo además este tipo de disponibilidad ideal cuando se busca controlar las tareas planeadas de mantenimiento (tareas proactivas: preventivas o predictivas) y las correctivas por separado (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 83).

Una vez elegida la disponibilidad adecuada para la medición, se realiza la selección de las expresiones matemáticas necesarias para el cálculo; esto es la ecuación [ 12 ]; expresión que requiere se determinen MTBMc, MTTR, MTBmp, Mp, MTBM,  $\overline{M}$  a través de una metodología pertinente.

#### **Cuarta etapa: Análisis de Weibull**

En esta esta etapa se realizó un análisis de weibull a cada uno de los conjuntos de datos tratados anteriormente mediante el método de máxima verosimilitud y la función de análisis de weibull del software estadístico Statgraphics y la función de análisis de supervivencia de Minitab. Los resultados del software antes mencionado determinan los parámetros de la distribución de weibull y las curvas características.

Con el ajuste de los datos 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 pudo determinar 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**

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, como se mencionó anteriormente, este análisis preliminar permite identificar las etapas de la curva de la bañera en la que se encuentra ubicada la flota en análisis; posteriormente se pueden obtener de los resultados de la distribución los indicadores pertinentes.

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.

El software ideal para ejecutar las pruebas es Statgraphics, ya que al correr un análisis de weibull o un ajuste de distribuciones, este programa muestra los resultados de estas pruebas adecuadamente en el StatAdvisor.

### **Pruebas de bondad de ajuste en Statgraphics**

El panel de pruebas de bondad de ajuste de Statgraphics es capaz de correr hasta 7 pruebas para determinar si es razonable que los datos provengan de la distribución ajustada en este caso weibull y las distribuciones más comunes usadas en análisis CMD mencionadas en el apartado 2.6 de este trabajo.

Para todas las pruebas, las hipótesis que se plantearon son (STATGRAPHICS, 2006):

- Hipótesis Nula: los datos son muestras independientes de la distribución especificada
- Hipótesis Alternativa: Los datos no son muestras independientes de la distribución especificada

Como se especificó en la metodología seguida para la medición de CMD a las locomotoras, las pruebas de bondad de ajuste se detallan a continuación:

**Prueba Kolmogorov-Smirnov D**, en esta prueba el software compara la distribución de acumulación de los datos con la distribución de acumulación ajustada. Primero evalúa la distribución de acumulación ajustada en cada uno de los datos y luego calcula y muestra el máximo de las distancias de la c.d.f. empírica por encima de la c.d.f. ajustada.

$$D^+ = \max_i \left( \frac{i}{n} - z_{(i)} \right) \quad [26]$$

Para luego calcular el máximo de las distancias de la c.d.f. empírica por debajo de la c.d.f. ajustada.

$$D^- = \max_i \left( z_{(i)} - \frac{i-1}{n} \right) \quad [27]$$

La estadística Kolmogorov es la más grande de las dos distancias (STATGRAPHICS, 2006).

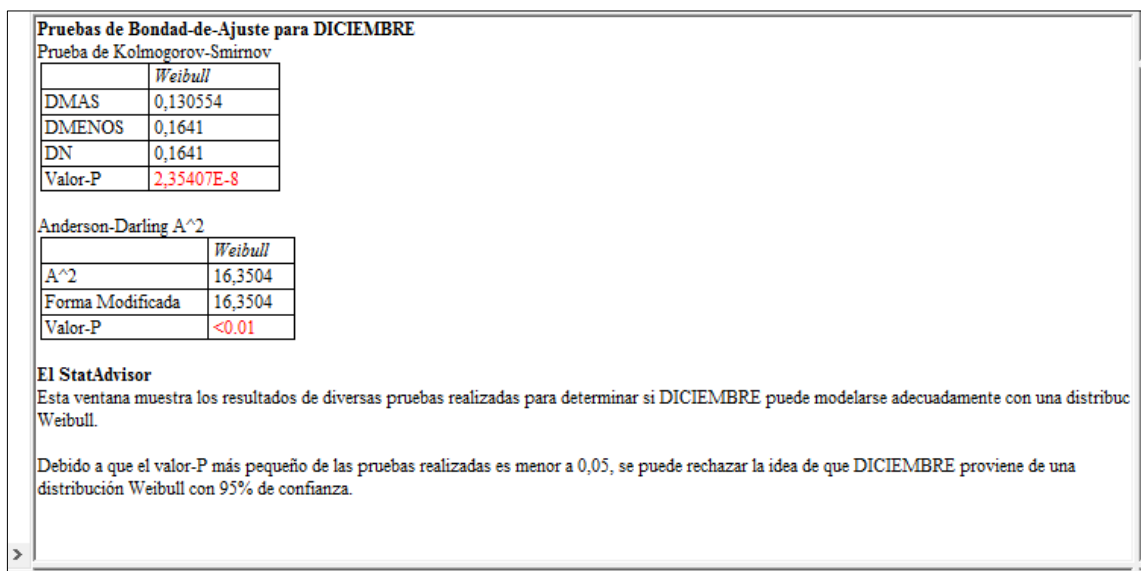
$$D = \max(D^+, D^-) \quad [28]$$



**Prueba Anderson-Darling  $A^2$** , esta estadística es una medida ponderada del área entre la c.d.f. empírica y ajustada. Es calculada de acuerdo a (STATGRAPHICS, 2006):

$$A^2 = -n - \frac{\sum_{i=1}^n \left( (2i - 1) \ln(z_{(i)}) + (2n + 1 - 2i) \ln(1 - z_{(i)}) \right)}{n} \quad [29]$$

Finalmente, un P-valor aproximado es calculado para las pruebas elegidas y es comparado a un nivel de significancia del 5%, la decisión de aceptar o rechazar la hipótesis es tomada en el Stat advisor del software, véase la Figura 2-4 en la que se muestra la forma en la que el programa rechaza el ajuste.



**Figura 2-4.** StatAdvisor rechazando el ajuste de los datos de Mp a la distribución de weibull.  
**Realizado por:** Ing. Luis F. Buenaño M.

La “forma modificada” de la estadística es especificada a la distribución que es ajustada en la figura se puede observar que la decisión de determinar si se rechaza una distribución especificada se realiza tomando una de las siguientes aproximaciones:

1. En muchos casos, la estadística modificada es comparada a la tabla de valores críticos que ha sido obtenida a través de estudios Monte Carlo. En tal caso, la salida desplegará uno de los siguientes datos:
  - “ $\geq 0.10$ ” si la estadística es menor o igual al valor tabulado para un  $\alpha=0.10$
  - “ $< 0.10$ ” si la estadística es mayor o igual al valor tabulado para  $\alpha=0.10$  y menor o igual al valor tabulado para  $\alpha=0.01$
  - “ $< 0.05$ ” si la estadística es mayor o igual al valor tabulado para  $\alpha=0.05$  y menor o igual al valor tabulado para  $\alpha=0.01$

- “<0.01” si la estadística es mayor o igual al valor tabulado para  $\alpha=0.01$
2. En pocos casos, P-valores aproximados son calculados (STATGRAPHICS, 2006).

En la Figura 3-4, se puede observar la comparación entre P-valores de las distribuciones weibull, lognormal y loglogística, ajustadas al conjunto de datos de Mp, y la decisión de aceptar la hipótesis de que el conjunto de datos de Mp sigue una distribución loglogística ya que P-valores mayores a 0.05 son aceptados con el 95% de confianza y los menores a 0.05 son rechazados.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para DICIEMBRE			
Prueba de Kolmogorov-Smirnov			
	Loglogística	Lognormal	Weibull
DMAS	0,0568328	0,0623774	0,130554
DMENOS	0,0457935	0,0764476	0,1641
DN	0,0568328	0,0764476	0,1641
Valor-P	0,224009	0,0380355	2,35407E-8

Anderson-Darling A^2			
	Loglogística	Lognormal	Weibull
A^2	1,10902	3,44903	16,3504
Forma Modificada	1,10902	3,44903	16,3504
Valor-P	>=0.10	<0.05	<0.01

**El StatAdvisor**  
 Esta ventana muestra los resultados de las pruebas realizadas para determinar si DICIEMBRE puede ser modelada adecuadamente por varias distribuciones.

Valores-P menores que 0,05 indicarian que DICIEMBRE no proviene de la distribución seleccionada con 95% de confianza.

**Figura 3-4.** StatAdvisor en el que se acepta el ajuste de los datos de Mp a la distribución loglogística en lugar de la weibull o lognormal.

**Realizado por:** Ing. Luis F. Buenaño M.

### Sexta etapa: Cálculos CMD

Se planteó investigar cuales son los resultados de indicadores CMD de la flota de locomotoras de FEEP para lo cual se realizó un análisis integral del parque automotor constituido por las 8 locomotoras. Luego de someter los datos a las cinco etapas anteriores, fue posible realizar todos los cálculos CMD, con las funciones que cumplen bien todos los ajustes.

Para presentar los datos se diseñaron tablas adecuadas para la presentación y el estudio de los resultados de los indicadores CMD referentes a la disponibilidad alcanzada.

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.

La disponibilidad alcanzada exige se cuenten con los siguientes 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 lograr mensualizar el cálculo de cada uno de estos indicadores y en su defecto lograr obtener una presentación de una disponibilidad mensualizada, se procedió de la siguiente manera:

En primer lugar, para el cálculo de los indicadores del primer mes, se filtraron los eventos que ocurrieron en la flota durante enero de 2015; dicho conjunto de datos obtenido es luego tratado con las cinco etapas descritas anteriormente y de esta forma se logra encontrar la distribución adecuada que permita el cálculo de los indicadores correspondientes.

Para el segundo mes y en adelante, al conjunto de datos de enero se le agregan los eventos del mes de febrero y se calcula; de la misma manera se realiza el resto de cálculos para los demás meses hasta cubrir todo el período de estudio.

Al finalizar, los resultados obtenidos al terminar el análisis del último mes, son los que representan el global obtenido durante el período de estudio; esto es el año 2015 y el primer trimestre de 2016, la distribución ajustada es la que representa el comportamiento de los indicadores CMD de la flota de locomotoras a partir del año 2015 y a partir de ésta se podrá obtener las gráficas que modelan la confiabilidad, mantenibilidad y el comportamiento de la flota con respecto a la curva de Davies.

Para el cálculo de la disponibilidad alcanzada se hace uso de la ecuación [ 12 ], y de una hoja de cálculo en formato “xlsx”; cada mes calculado entrega un valor de disponibilidad

alcanzada, siendo la disponibilidad al mes de diciembre la que represente a la alcanzada por la flota de la empresa durante el año 2015.

### **Medición de MTBMC**

Para la medición del MTBMc se usaron los tiempos entre mantenimiento correctivo y la metodología especificada, los resultados se presentan en la Tabla 6-4.

La distribución que mejor se ajusta a los datos es la loglogística de 3 parámetros, la cual cumplió con las pruebas de bondad de ajuste especificadas con el 95% de confianza.

### **Medición de MTTR**

Para la medición del MTTR se usaron los tiempos entre mantenimiento correctivo y la metodología especificada, los resultados se presentan en la Tabla 7-4.

La distribución que mejor se ajusta a los datos es la loglogística de 3 parámetros, la cual cumplió con las pruebas de bondad de ajuste especificadas con el 95% de confianza.

### **Medición de MTBMp**

Para la medición del MTBMp se usaron los tiempos entre mantenimiento correctivo y la metodología especificada, los resultados se presentan en la Tabla 8-4.

La distribución que mejor se ajusta a los datos es la lognormal de 3 parámetros, la cual cumplió con las pruebas de bondad de ajuste especificadas con el 95% de confianza.

### **Medición de Mp**

Para la medición del Mp se usaron los tiempos entre mantenimiento correctivo y la metodología especificada, los resultados se presentan en la Tabla 9-4.

La distribución que mejor se ajusta a los datos es la loglogística de 3 parámetros, la cual cumplió con las pruebas de bondad de ajuste especificadas con el 95% de confianza.

**Tabla 6-4:** Resultados del cálculo de MTBMc

Período	MTBMc	Análisis Weibull		PRUEBAS ANÁLISIS WEIBULL				Distribución asumida	PRUEBAS DISTRIBUCIÓN ASUMIDA			
				ANDERSON DARLING		KOLMOGORNOV SMIRLOV			ANDERSON DARLING		KOLMOGORNOV SMIRLOV	
		Beta	Eta	Valor-P	Cumple	Valor-P	Cumple		Valor-P	Cumple	Valor-P	Cumple
Ene-15	87,298	1,34	95,083	>=0.10	Si	0,679989	Si	Weibull				
Feb-15	63,978	1,29	69,09	>=0.10	Si	0,5975	Si	Weibull				
Mar-15	66,35	1,12	69,14	>=0.10	Si	0,263061	Si	Weibull				
Abr-15	72,05	1,09	74,34	>=0.10	Si	0,177872	Si	Weibull				
May-15	66,23	1,01	68,36	<0.10	Si	0,0477188	No	Lognormal 3p	>=0.10	Si	0,267695	Si
Jun-15	62,8	1,06	66,71	<0.05	No	0,0218893	No	Lognormal 3p	>=0.10	Si	0,160264	Si
Jul-15	62,5	1,06	69,17	<0.05	No	0,0145348	No	Lognormal 3p	>=0.10	Si	0,160264	Si
Ago-15	67,53	1,06	71,36	<0.05	No	0,0138755	No	Lognormal 3p	<0.10	Si	0,196864	Si
Sept-15	70,29	1,05	73,67	<0.01	No	0,0106969	No	Lognormal 3p	<0.10	Si	0,150976	Si
Oct-15	66,03	0,99	67,62	<0.01	No	0,00844826	No	Lognormal 3p	>=0.10	Si	0,192194	Si
Nov-15	62,49	1	64,75	<0.01	No	0,00412507	No	Lognormal 3p	<0.10	Si	0,105044	Si
Dic-15	61,69	1,01	63,93	<0.01	No	0,00148543	No	Loglogística 3p	>=0.10	Si	0,208313	Si
Ene-16	61,14	1,02	64,03	<0.01	No	0,0019559	No	Loglogística 3p	>=0.10	Si	0,273448	Si
Feb-16	59,26	1,03	62,59	<0.01	No	0,00139368	No	Loglogística 3p	>=0.10	Si	0,246641	Si
Mar-16	57,63	1,04	61,25	<0.01	No	0,000667761	No	Loglogística 3p	>=0.10	Si	0,266056	Si

Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño

**Tabla 7-4:** Resultados del cálculo de MTTR

Período	MTTR	Análisis Weibull		PRUEBAS ANÁLISIS WEIBULL				Distribución asumida	PRUEBAS DISTRIBUCIÓN ASUMIDA			
				ANDERSON DARLING		KOLMOGORNOV SMIRLOV			ANDERSON DARLING		KOLMOGORNOV SMIRLOV	
		Beta	Eta	Valor-P	Cumple	Valor-P	Cumple		Valor-P	Cumple	Valor-P	Cumple
Ene-15	3,13	1,29	3,39	>=0.10	Si	0,883543	Si	Weibull				
Feb-15	2,53	1,36	2,77	>=0.10	Si	0,814109	Si	Weibull				
Mar-15	2,12	1,27	2,29	>=0.10	Si	0,39369	Si	Weibull				
Abr-15	3,17	0,81	2,83	>=0.10	Si	0,259464	Si	Weibull				
May-15	3	0,85	2,76	<0.10	Si	0,0876304	Si	Weibull				
Jun-15	2,9	0,84	2,65	<0.10	Si	0,0710516	Si	Weibull				
Jul-15	2,69	0,84	2,45	<0.05	Si	0,0411628	Si	Weibull				
Ago-15	2,92	0,83	2,65	<0.10	Si	0,138174	Si	Weibull				
Sept-15	5,45	0,82	2,81	<0.05	No	0,0908615	Si	Loglogística 3p	>=0.10	Si	0,174293	Si
Oct-15	6,08	0,8	2,95	<0.05	No	0,0175411	No	Loglogística 3p	>=0.10	Si	0,174293	Si
Nov-15	6,65	0,79211	3,13	<0.05	No	0,0175966	No	Loglogística 3p	>=0.10	Si	0,0721035	Si
Dic-15	6,92	0,84	2,45	<0.05	No	0,0209496	No	Loglogística 3p	>=0.10	Si	0,0613583	Si
Ene-16	7,64	0,8	3,39	<0.05	No	0,0270331	No	Loglogística 3p	>=0.10	Si	0,0622554	Si
Feb-16	7,38	0,8	3,47	<0.01	No	0,0177179	No	Loglogística 3p	>=0.10	Si	0,0736618	Si
Mar-16	6,72	0,81	3,42	<0.01	No	0,0110259	Si	Loglogística 3p	>=0.10	Si	0,0709853	Si

Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño

**Tabla 8-4:** Resultados del cálculo de MTB Mp.

Período	MTB Mp	Análisis Weibull		PRUEBAS ANÁLISIS WEIBULL				Distribución asumida	PRUEBAS DISTRIBUCIÓN ASUMIDA			
				ANDERSON DARLING		KOLMOGORNOV SMIRLOV			ANDERSON DARLING		KOLMOGORNOV SMIRLOV	
		Beta	Eta	Valor-P	CUMPLE	Valor-P	CUMPLE		Valor-P	CUMPLE	Valor-P	CUMPLE
Ene-15	33,62	1,79	33,62	>=0.10	Si	0,743769	Si	Weibull				
Feb-15	34,22	1,63	38,23	>=0.10	Si	0,902013	Si	Weibull				
Mar-15	33,8	1,5	37,45	>=0.10	Si	0,230985	Si	Weibull				
Abr-15	32,89	1,51	36,48	>=0.10	Si	0,104712	Si	Weibull				
May-15	31,72	1,48	35,09	>=0.10	Si	0,0692028	Si	Weibull				
Jun-15	31,08	1,53	34,51	<0.10	Si	0,0512908	Si	Weibull				
Jul-15	30,73	1,55	34,38	<0.10	Si	0,0368753	No	Logormal 3p	>=0.10	Si	0,302549	Si
Ago-15	30,9	1,46	34,4	<0.05	No	0,0159527	No	Logormal 3p	>=0.10	Si	0,219889	Si
Sept-15	30,36	1,5	33,74	<0.05	No	0,0197001	No	Logormal 3p	>=0.10	Si	0,117383	Si
Oct-15	30,37	1,48	33,82	<0.05	No	0,182478	No	Logormal 3p	>=0.10	Si	0,182478	Si
Nov-15	30,04	1,49	33,48	<0.05	No	0,00920316	No	Logormal 3p	>=0.10	Si	0,0916944	Si
Dic-15	29,22	1,48	32,53	<0.05	No	0,00711346	No	Logormal 3p	>=0.10	Si	0,0971271	Si
Ene-16	28,74	1,49	32,03	<0.05	No	0,00489504	No	Logormal 3p	>=0.10	Si	0,143531	Si
Feb-16	28,53	1,5	31,85	<0.05	No	0,00250055	No	Logormal 3p	>=0.10	Si	0,117874	Si
Mar-16	28,18	1,5	31,46	<0.05	No	0,00275047	No	Logormal 3p	>=0.10	Si	0,128923	Si

Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño

**Tabla 9-4:** Resultados del cálculo de Mp.

Período	Mp	Análisis Weibull		PRUEBAS ANÁLISIS WEIBULL				Distribución asumida	PRUEBAS DISTRIBUCIÓN ASUMIDA			
				ANDERSON DARLING		KOLMOGOROV SMIRLOV			ANDERSON DARLING		KOLMOGOROV SMIRLOV	
		Beta	Eta	Valor-P	Cumple	Valor-P	CUMPLE		Valor-P	Cumple	Valor-P	Cumple
Ene-15	6,66	0,83	7,77	<0.01	No	0,01881630	No	Loglogística 3P	>=0.10	Si	0,572155	Si
Feb-15	5,93	0,78	8,27	<0.01	No	0,00099228	No	Loglogística 3P	>=0.10	Si	0,259534	Si
Mar-15	5,64	0,87	7,27	<0.01	No	0,00009924	No	Loglogística 3P	>=0.10	Si	0,355852	Si
Abr-15	5,86	0,91	7,33	<0.01	No	0,00003066	No	Loglogística 3P	>=0.10	Si	0,240912	Si
May-15	6,07	0,95	7,2	<0.01	No	2,78976E-05	No	Loglogística 3P	>=0.10	Si	0,206736	Si
Jun-15	6,4	0,98	7,33	<0.01	No	2,71001E-05	No	Loglogística 3P	>=0.10	Si	0,265589	Si
Jul-15	6,51	1	7,33	<0.01	No	2,17646E-05	No	Loglogística 3P	>=0.10	Si	0,289621	Si
Ago-15	6,46	1,03	7,23	<0.01	No	6,34779E-06	No	Loglogística 3P	>=0.10	Si	0,202575	Si
Sept-15	6,59	1,03	7,32	<0.01	No	5,47047E-06	No	Loglogística 3P	>=0.10	Si	0,244498	Si
Oct-15	6,97	0,93	7,81	<0.01	No	1,53E-07	No	Loglogística 3P	>=0.10	Si	0,359941	Si
Nov-15	7,15	0,93	7,9	<0.01	No	6,33E-08	No	Loglogística 3P	>=0.10	Si	0,236735	Si
Dic-15	7,13	0,94	7,8	<0.01	No	2,18377E-08	No	Loglogística 3P	>=0.10	Si	0,228702	Si
Ene-16	7,1	0,88	7,89	<0.01	No	0	No	Loglogística 3P	>=0.10	Si	0,245317	Si
Feb-16	6,97	0,89	7,75	<0.01	No	0	No	Loglogística 3P	>=0.10	Si	0,283532	Si
Mar-16	6,93	0,9	7,7	<0.01	No	0	No	Loglogística 3P	>=0.10	Si	0,260478	Si

Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño



## Medición de disponibilidad Alcanzada

La medición de disponibilidad alcanzada se presenta en la Tabla 10-4, y se consigue después de registrar los datos obtenidos en las mediciones anteriores y el aplicar la fórmula de cálculo en las celdas donde se presentan los resultados.

**Tabla 10-4:** Medición de la disponibilidad alcanzada de la flota de locomotoras de FEED.

PERÍODO	MTBMc	MTTR	MTBMp	Mp	MTBM	$\bar{M}$	D <sub>A</sub>
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

Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

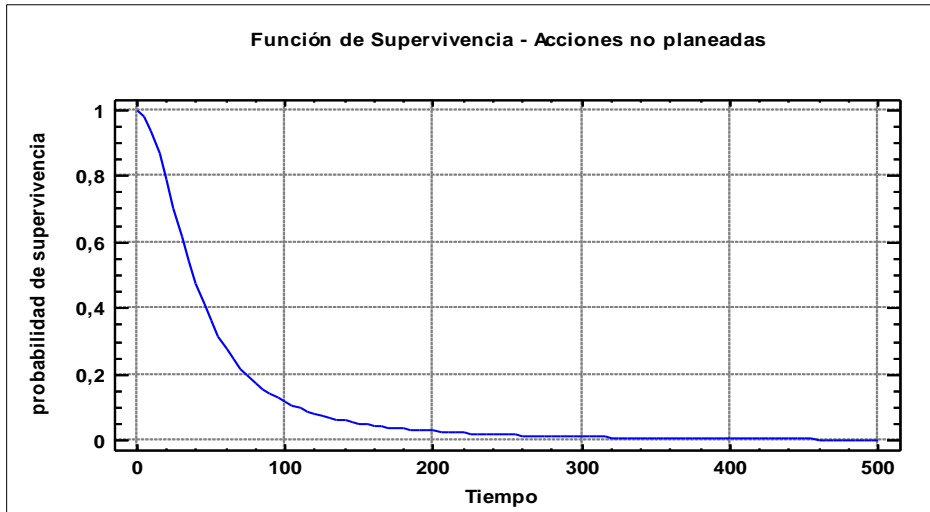
Del análisis preliminar de los resultados presentados, se puede apreciar que la disponibilidad alcanzada en el mes de enero de 2015 es de 81,04%, y decae paulatinamente hasta terminar el estudio en el mes de marzo de 2016 a un valor del 73,30%.

### 4.1.7 *Análisis CMD*

#### **Análisis de la confiabilidad influenciada por mantenimientos correctivos**

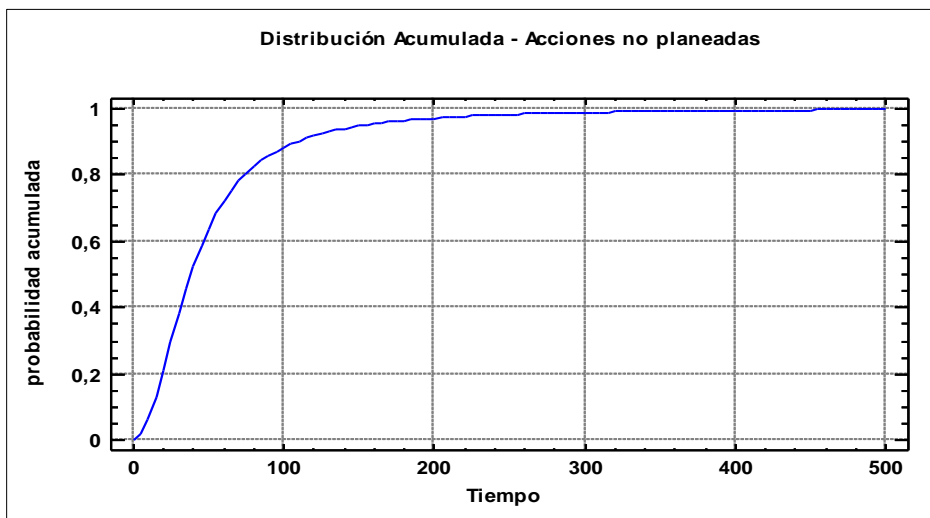
Para el MTBMc, o sea el comportamiento de la flota debido a fallas y reparaciones, objeto de mantenimiento correctivo; la curva de la función de confiabilidad R(t) se muestra en la Figura 4-4.

La gráfica es generada a partir de la distribución loglogística de tres parámetros, 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.



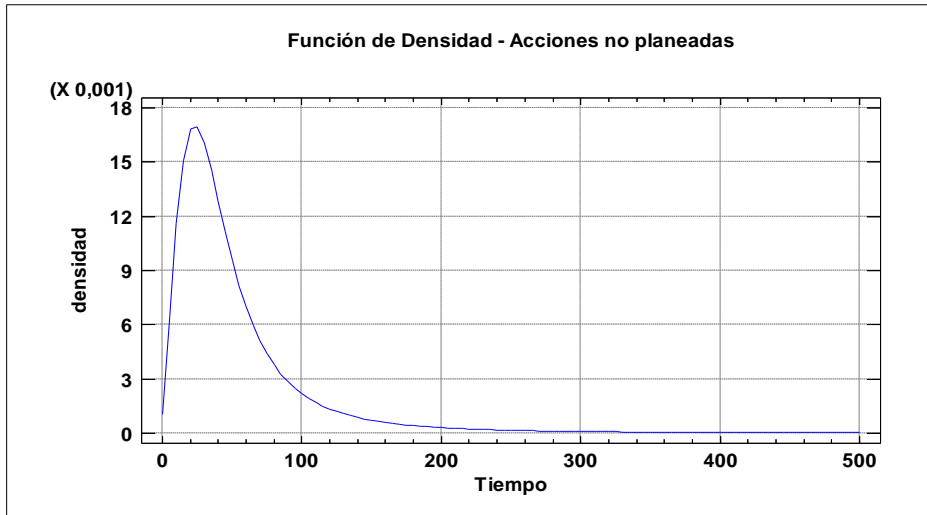
**Figura 4-4.** Función de confiabilidad influenciada por mantenimientos correctivos del análisis integral de la flota.  
**Realizado por:** Ing. Luis F. Buenaño M.

La confiabilidad de la flota asociada al MTBMc es del 29,68% y la probabilidad de falla o no confiabilidad es del 70,32%. La función de distribución acumulada de fallas se presenta en la Figura 5-4.



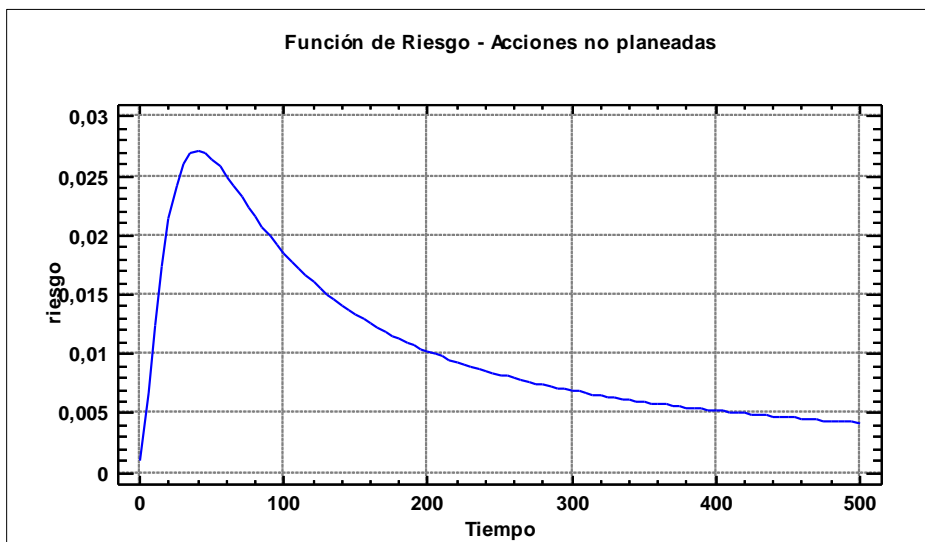
**Figura 5-4.** Distribución acumulada de fallas influenciada por los mantenimientos correctivos del análisis integral de la flota.  
**Realizado por:** Ing. Luis F. Buenaño M.

En la función de densidad que se muestra en la Figura 6-4, se puede apreciar que en cada avance del tiempo crece la probabilidad de falla nueva hasta alcanzar el punto máximo en el valor de 25,04 h, a partir de este punto empieza a disminuir paulatinamente el valor de  $f(t)$ , mostrando que cada vez será menor la probabilidad de fallas nuevas.



**Figura 6-4.** Función de densidad influenciada por los mantenimientos correctivos del análisis integral de la flota.  
**Realizado por:** Ing. Luis F. Buenaño M.

La función de riesgo (Figura 7-4), muestra un comportamiento en el que hasta llegar a las 40 h, la función de riesgo crece, a partir de ese momento la tasa de fallas decrece hasta llegar a asumir una característica constante.

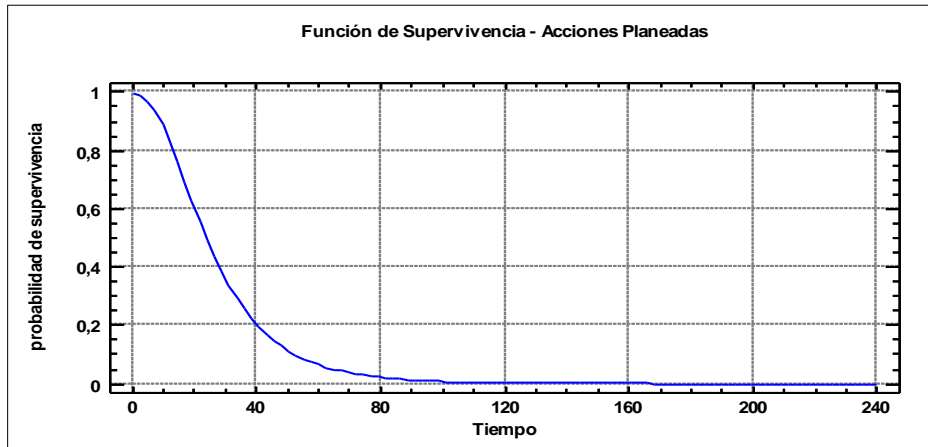


**Figura 7-4.** Función de riesgo de la confiabilidad influenciada por mantenimiento correctivo.  
**Realizado por:** Ing. Luis F. Buenaño M.

El análisis de las funciones obtenidas a partir de los eventos de mantenimiento correctivo, dan cuenta de que se debe prestar especial atención, el mejorar las actividades de mantenimiento preventivas, en especial la frecuencia que se realiza antes de las 57,63 h ya que este período es en el que se da la mayor probabilidad de que se produzcan la mayor cantidad de problemas.

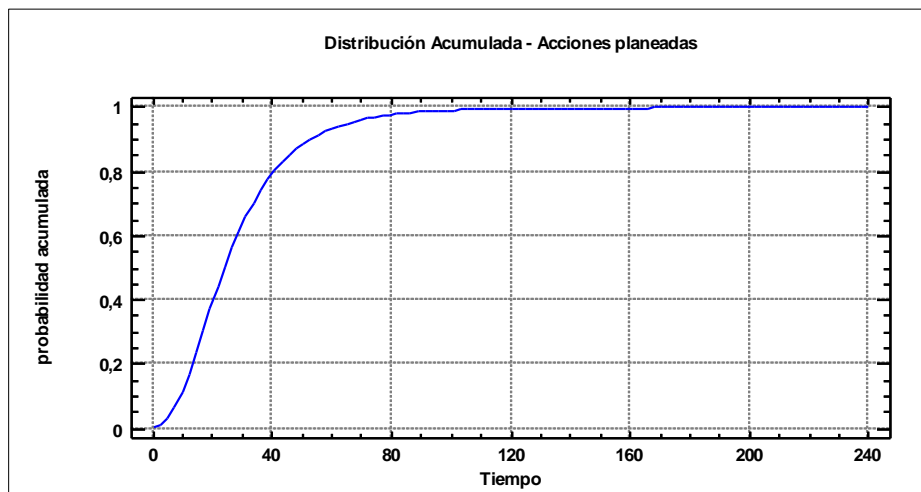
## Análisis de la confiabilidad influenciada por los mantenimientos planeados.

Durante la realización del análisis del comportamiento de los mantenimientos planeados, fue 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.



**Figura 8-4.** Función de Confiabilidad en mantenimientos planeados.  
Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

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.

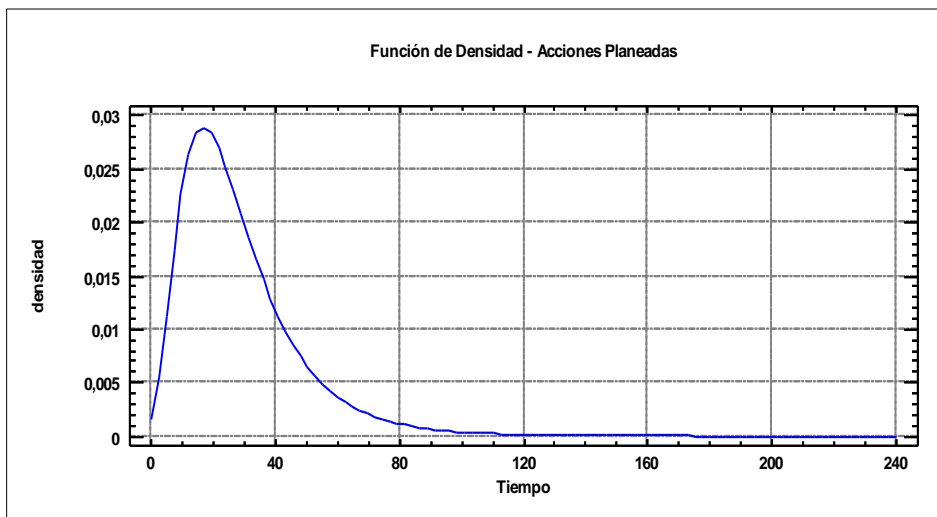


**Figura 9-4.** Función de distribución acumulada en mantenimientos planeados.  
Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

En la Figura 8-4, se puede apreciar la función de confiabilidad o supervivencia debida a las acciones planeadas, la cual indica que a las 28,18 h, la probabilidad de funcionamiento sin que tengan que producirse acciones planeadas es del 39,77%; de la misma manera la función de supervivencia disminuye drásticamente en función del tiempo.

En la Figura 9-4, la función de distribución acumulada indica que a las 28,18 h, la probabilidad de ocurrencia de las acciones preventivas es del 60,23 % y que a las 94,63 h es del 99%.

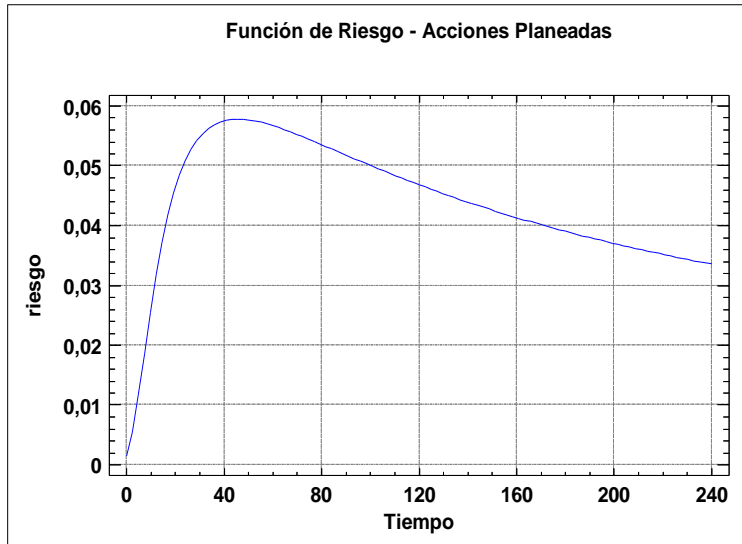
En cuanto a la función de densidad presentada en la Figura 10-4, el análisis indica que en la confiabilidad influenciada por los mantenimientos planeados la  $f(t)$  crece gradualmente hasta llegar a su máximo valor a las 16,86 h, para después decrecer gradualmente; lo cual exhibe un comportamiento muy similar al presentado en los mantenimientos no planeados.



**Figura 10-4.** Función de densidad en los mantenimientos planeados  
Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

En cuanto a lo que tiene que ver a la función de riesgo debida a los mantenimientos planeados, esta de igual manera se comporta como la debida a las acciones correctivas; crece rápidamente hacia la derecha hasta las 49,148 h para luego decrecer paulatinamente.

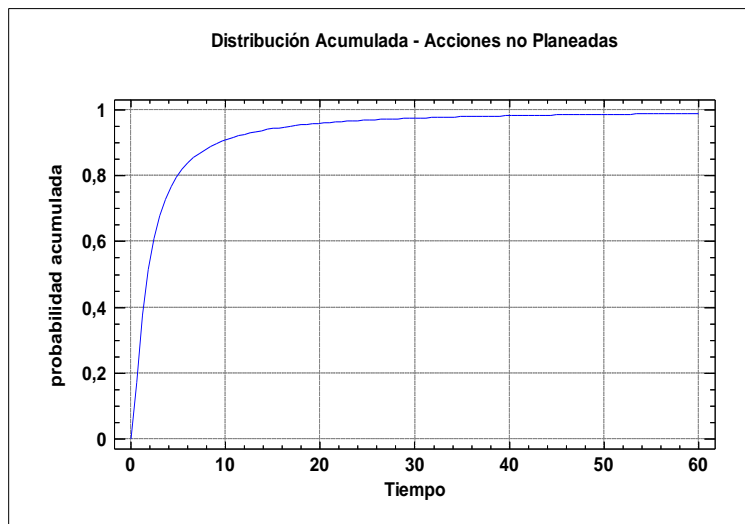
El análisis debido a la confiabilidad influenciada por los mantenimientos planeados, claramente indica que la indisponibilidad de la flota imputable a fallas que requieren acciones correctivas son mayores a las debidas por la ejecución de mantenimientos planeados, esto es muy evidente debido a que los resultados al comparar el MTBMp de 28,18 h, con el MTBMc de 57,63 h logra determinar que la ejecución de las acciones planeadas no logra controlar completamente las fallas en la flota.



**Figura 11-4.** Función de riesgo en los mantenimientos planeados  
 Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

Del análisis se desprende el mencionar la urgente necesidad de determinar cuáles son los sistemas recurrentes en los cuales se están produciendo las fallas y que influyen en la disminución de confiabilidad de la flota, además de determinar las posibles soluciones, las cuales puedan ser implementadas como tareas de mantenimiento preventivo en los programas de mantenimiento que actualmente se utilizan.

### **Análisis de la función de mantenibilidad influenciada por las reparaciones TTR**

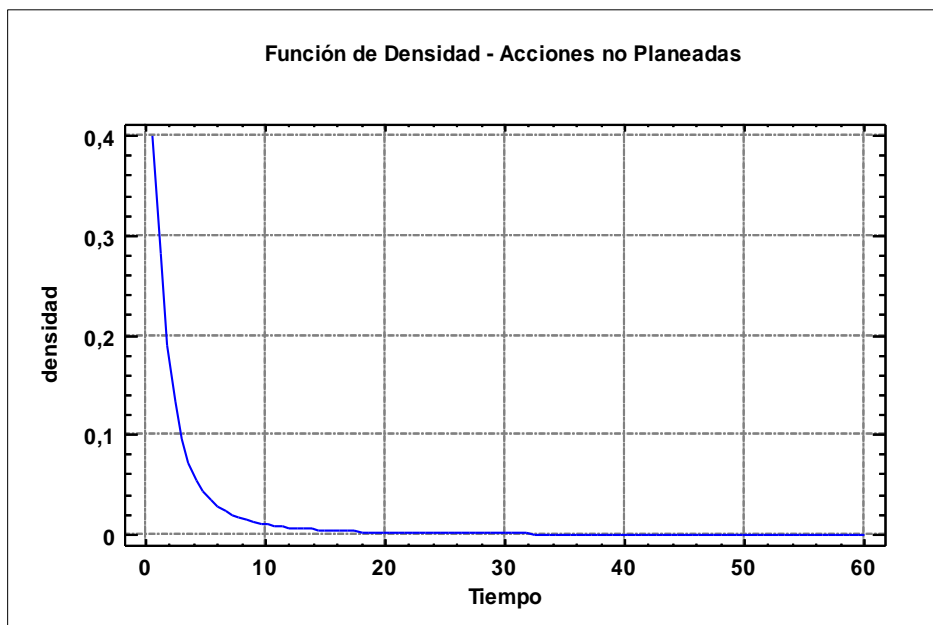


**Figura 12-4.** Función de mantenibilidad en las acciones no planeadas.  
 Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

En cuanto a lo que tiene que ver a la mantenibilidad debida a las acciones correctivas o reparaciones, la distribución estadística que mejor se ajusta es la 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.

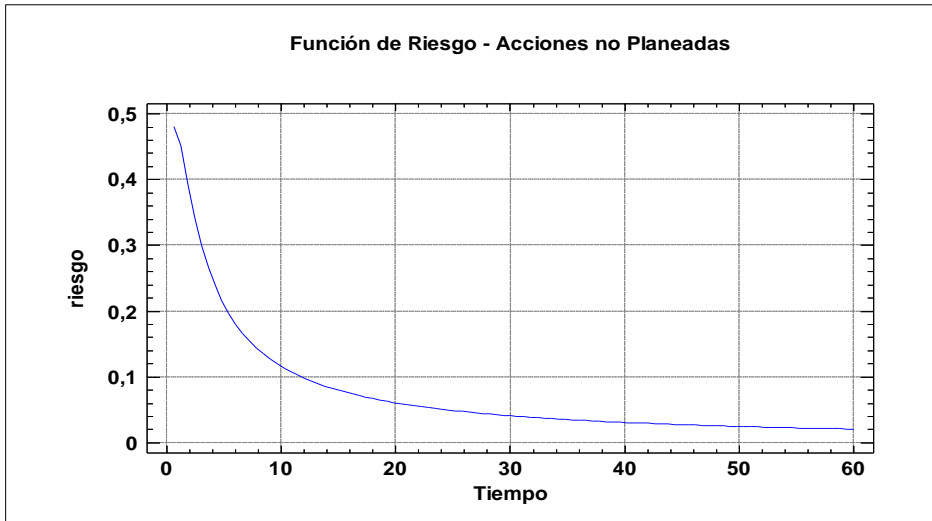
El valor de mantenibilidad asociado al MTTR calculado expresa que el 85,79% de las veces que se dan reparaciones en la flota, estas se completan hasta en 6,72 h. El lograr una probabilidad del 99% de que las funciones de la flota se recuperen se da a las 61 h, lo cual sería prácticamente el máximo valor en el cual se puedan terminar las reparaciones. La función de mantenibilidad se puede ver en la Figura 12-4.



**Figura 13-4.** Función de densidad de los TR en las acciones no planeadas.  
Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

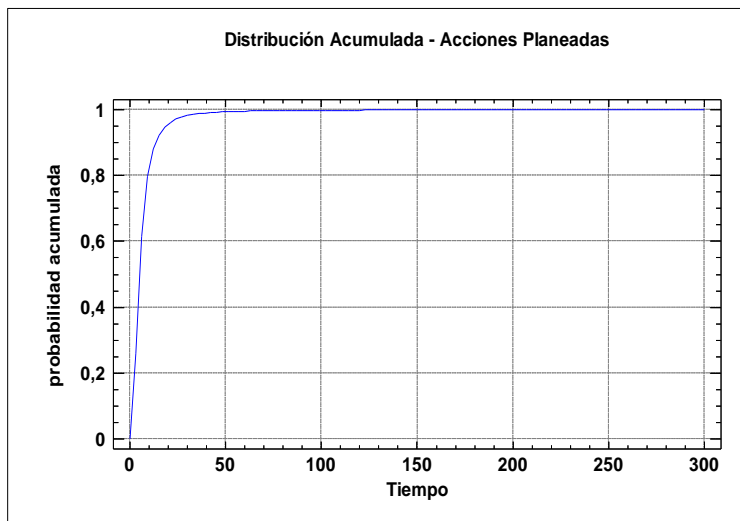
La función de densidad en la Figura 13-4, como también la función de tasa de reparación en la Figura 14-4; muestran que las acciones correctivas que se están llevando a cabo por parte del departamento de mantenimiento son exitosas, sin embargo uno de los objetivos de un departamento de mantenimiento es el mejorar la disponibilidad, lo que en este caso se conseguiría al disminuir el MTTR conservando los buenos resultados obtenidos.

Es urgente entonces el aplicar un modelo de gestión de mantenimiento que logre dar buenos resultados en cuanto a la atención de fallas, pero con la disminución del MTTR, esto puede lograrse al reformar las políticas de mantenimiento y los procedimientos que se ejecuten en los procesos de atención de las fallas.



**Figura 14-4.** Función de tasa de reparación en las acciones no planeadas.  
 Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

**Análisis de la función de mantenibilidad influenciada por las acciones planeadas de mantenimiento**



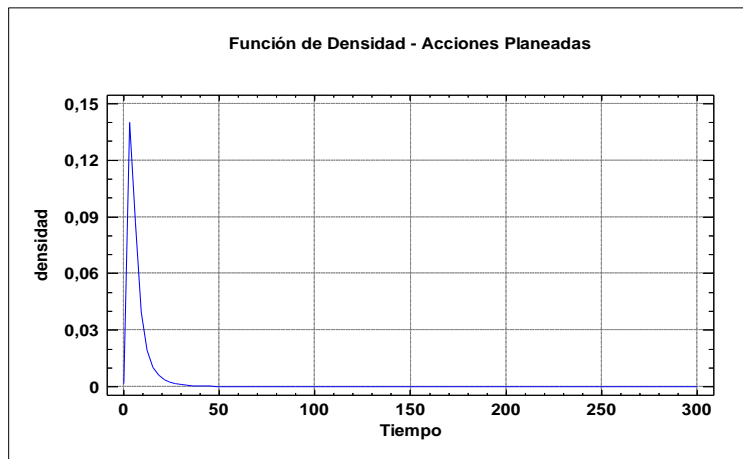
**Figura 15-4.** Función de mantenibilidad en las acciones planeadas.  
 Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

La función de mantenibilidad obtenida en la Figura 15-4, a partir de los datos de tiempos de ejecución de mantenimiento en cuanto a las acciones planeadas se ajusta adecuadamente a la distribución loglogística 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

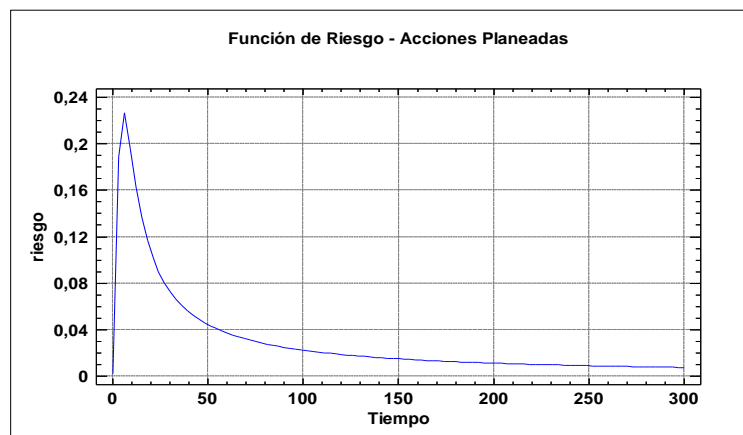


procedimientos y políticas que el modelo de gestión determina. El tiempo en que se ejecutan las acciones de mantenimiento planeado es importante ya que genera indisponibilidad del sistema y se puede apreciar que no están siendo lo eficaces que se desearía.



**Figura 16-4.** Función de densidad en las acciones planeadas.  
Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

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.



**Figura 17-4.** Función de tasa de reparación en las acciones planeadas.  
Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

La función de densidad en la Figura 16-4 y la función de tasa de reparaciones en la Figura 17-4, presentan un comportamiento similar, y demuestran que el  $M_p$  de 6,93h es el tiempo más probable de mantenimiento preventivo.

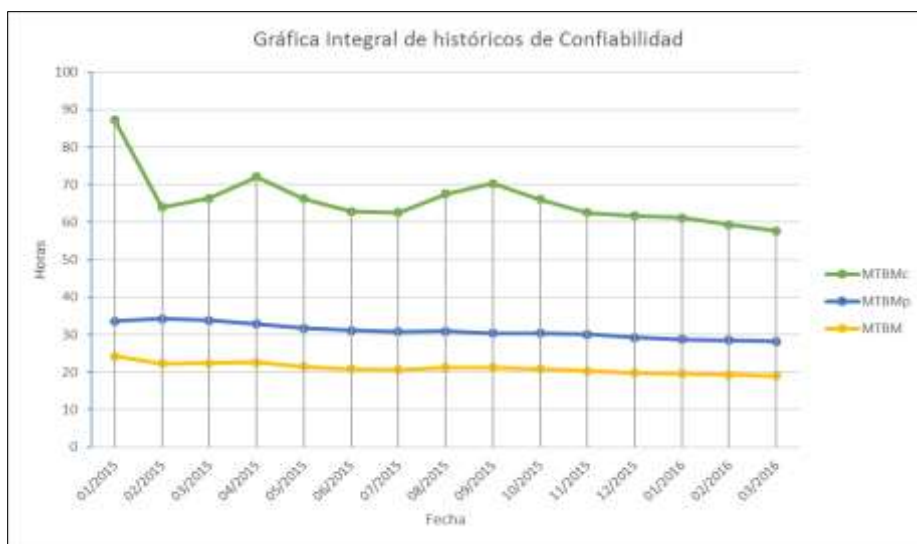
El crecimiento de la función de tasa de reparaciones muestra que las acciones preventivas se incrementan hasta el valor de  $M_p$ , para luego decrecer. Es imperante que se trabaje en la optimización de la realización de las actividades de mantenimiento planeadas para lograr que estas o bien se mantengan constantes o disminuyan y lo más importante que estas logren controlar adecuadamente las fallas.

### Análisis histórico de indicadores CMD de la flota

La evaluación de cada uno de los eventos en forma mensual (Mantenimientos correctivos, preventivos, tiempos de reparación y mantenimiento) que ocurrieron en la flota, se realiza con el fin de determinar las directrices de cada uno de ellos y que afectan a la flota en general, con miras a la mejora del sistema de gestión de mantenimiento tendiente a mejorar cada uno de los resultados de CMD.

### Análisis histórico de confiabilidad de la flota

En la Figura 18-4, se puede apreciar la gráfica integral de históricos de confiabilidad, la cual fue modelada en función de los resultados obtenidos de los indicadores MTBMc, MTBmp y MTBM desde enero de 2015 hasta marzo de 2016. En ella se puede apreciar cómo se comportan los indicadores de confiabilidad en el tiempo de análisis de la flota.



**Figura 18-4.** Gráfica para el análisis histórico de los indicadores de confiabilidad.  
Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

En el caso del 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; es apreciable sin embargo que en los meses

de abril y septiembre se dan fluctuaciones al alta, para luego tener un descenso dentro de los siguientes 6 meses.

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.

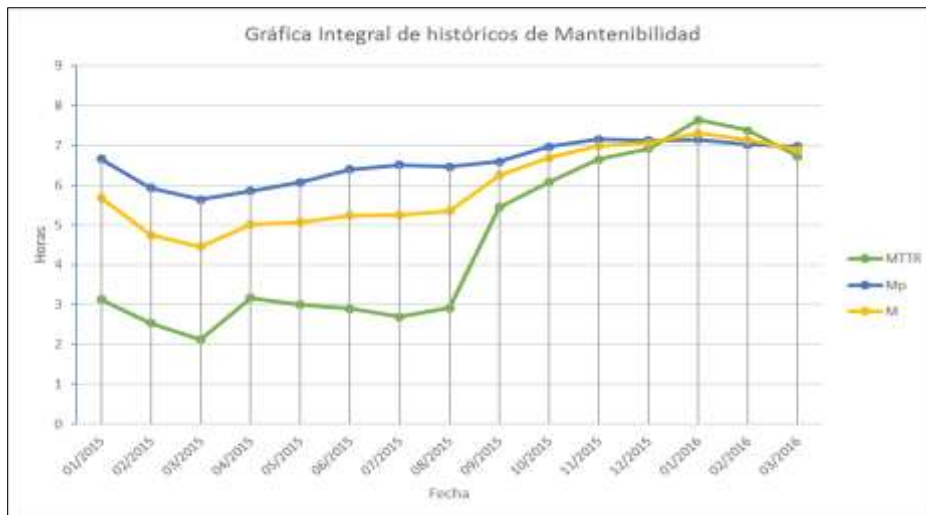
El MTBM el cual es un indicador que está en función de los tiempos de mantenimiento anteriores, demuestra un comportamiento similar al MTBMp; para aumentar la disponibilidad de la flota se necesita que el MTBM incremente su valor. La mejor forma de hacerlo es atacar las fallas recurrentes que afectan el sistema y lograr que los mantenimientos preventivos sean capaces de controlar las fallas de la flota y por ende el control de los mantenimientos correctivos.

### **Análisis histórico de mantenibilidad de la flota**

En el caso de mantenibilidad la gráfica para el análisis se construye con los resultados de los indicadores MTTR,  $M_p$  y  $\overline{M}$ , el análisis se lo realiza desde enero 2015 hasta marzo de 2016 y en ella se puede analizar cuál es el comportamiento de los indicadores de mantenibilidad en la flota de locomotoras y que son producto del modelo de gestión de mantenimiento aplicado.

Uno de los indicadores más críticos es el MTTR el cual comienza con un valor de 3,13 h y crece hasta llegar a marzo con un valor de 6,72 h en marzo de 2016, se puede observar un ascenso fluctuante con el mejor valor de mantenibilidad en el mes de marzo de 2015.

En cuanto al indicador  $M_p$ , este también indica un incremento en su valor, comienza con un valor de 6,66 h y termina con uno de 6,98 h. El indicador  $\overline{M}$  presenta el mismo comportamiento, teniendo en cuenta que este indicador está en función de MTTR y  $M_p$ , lo ideal es que para lograr asegurar una disponibilidad alta, este debe disminuir o en su defecto mantenerse constante para no mermar en el nivel de disponibilidad y más bien lograr que se incremente.



**Figura 19-4.** Gráfica para el análisis histórico de la mantenibilidad  
 Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

Muchas de las ocasiones el disminuir la mantenibilidad en este caso los indicadores MTTR y Mp a través de la implantación de un modelo de gestión de mantenimiento que permita optimizar los procedimientos y protocolos que se siguen al momento de ejecutar las actividades de mantenimiento.

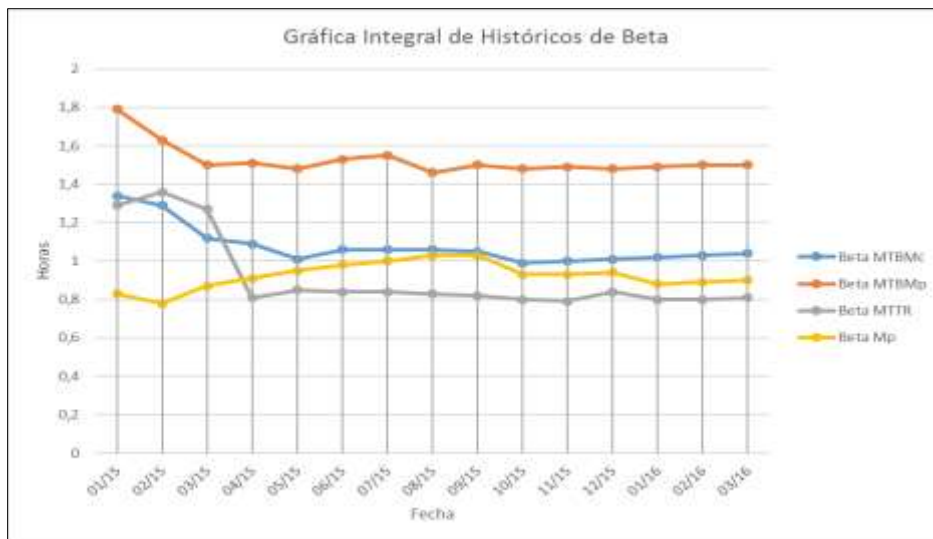
### **Análisis histórico de betas de la flota**

Las betas de la flota fueron obtenidas mediante el análisis de weibull a cada uno de los indicadores de CMD, la gráfica resultante para el análisis se muestra en la Figura 20-4 y en ella se indica la ubicación de los indicadores en la curva de Davies.

Para el caso del beta de MTBMc este presenta un descenso paulatino de enero a mayo de 2015, posteriormente su comportamiento se va estabilizando hasta terminar en un valor de 1,04 motivo por el cual se puede determinar que la flota se encuentra superando la fase II de la curva de Davies y empezando la fase III etapa I.

En esta fase las fallas que aparecen suelen ser repetitivas y por ende conocidas, por lo cual los departamentos de mantenimiento tienden a ganar experiencia en el tratamiento de fallas. Generalmente este tipo de fallas son debidas a los efectos del tiempo por causas de uso, abuso o desuso y es la etapa en donde la aplicación adecuada de acciones planeadas o preventivas puede lograr buenos resultados debido a que las fallas se conocen y se puede lograr un buen control sobre ellas.

En cuanto al beta del MTBMp fluctúa entre valores desde 1,79 a 1,5 lo que asegura que la ejecución de los mantenimientos preventivos se puede llegar a optimizar para lograr una mejora, especialmente luego de detectar las fallas recurrentes.



**Figura 20-4.** Gráfica para el análisis integral de Beta  
 Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

El beta del MTTR decae desde 1,29 hasta 0,81 presentando un comportamiento constante desde abril de 2016, al posicionarse con un beta inferior a uno en mantenibilidad esto se interpreta como que los tiempos de realización de las reparaciones correctivas aún no están plenamente estandarizadas y que el tiempo de realización de estas es significativamente diferente.

En cuanto al beta del Mp se ubica en la misma zona inferior a 1, con un beta que crece desde un valor de 0,83 hasta uno de 0,9 presentando un buen nivel casi de 1 en los meses de julio a septiembre. La variación de este beta representa que los tiempos en que se realizan las acciones preventivas se está tratando de estabilizar pero sin embargo no se logra completamente.

### **Análisis histórico de la disponibilidad**

El análisis de la disponibilidad es el último indicador CMD que se analiza y resulta de la interacción entre los indicadores de confiabilidad y mantenibilidad en la expresión [ 12 ].

La disponibilidad en análisis en la Figura 21-4, es la disponibilidad alcanzada lo cual se expresa en porcentaje y representa la posibilidad de la flota de estar disponible para prestar un servicio; de su interpretación se puede mencionar que en general la flota tiene

un bajo nivel de disponibilidad. Esta comienza con un valor de 81,04% en el mes de enero de 2015 y termina con una disponibilidad de 73,3% en el mes de marzo de 2016.



**Figura 21-4.** Gráfica para el análisis histórico de la Disponibilidad  
Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

La curva exhibe un comportamiento descendente en donde el valor más alto de disponibilidad alcanzada se da hasta el mes de marzo de 2015 con un valor del 83,41%, mientras que el más bajo se dió hasta enero de 2016 con un valor de 72,81%.

La disponibilidad alcanzada 73,29% representa en términos generales el valor alcanzado por la flota en el período de estudio y en sí misma es un indicador del resultado de la aplicación del modelo de gestión de mantenimiento actual en los talleres de FEOP ya que se considera tanto las acciones correctivas como las acciones preventivas de mantenimiento las cuales están regidas por dicho modelo de gestión.

Los valores de disponibilidad alcanzados en una flota son de vital importancia para una empresa que presta servicios de transporte y en este caso turísticos, es indispensable entonces el lograr que estos niveles de disponibilidad se incrementen rápidamente.

### **Recomendaciones luego del análisis CMD**

En síntesis, luego de la medición y evaluación de CMD las recomendaciones son las siguientes:

- Incrementar la confiabilidad mediante la identificación de los sistemas con fallas más recurrentes e implementar un análisis de fallas que conlleve a su erradicación.
- Convertir las reparaciones debidas a fallas imprevistas en mantenimientos planeados de tal manera que se eviten esas fallas en el futuro.
- Procurar la mejora de las actividades de mantenimiento preventivo






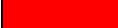
- Disminuir la mantenibilidad en lo posible a través de la mejora de los procedimientos para el mantenimiento.
- Revisar el sistema de gestión de mantenimiento y evaluarlo para determinar las áreas de mejora.
- Controlar y medir permanentemente los valores CMD, para constatar el mejoramiento continuo de los indicadores.

#### **4.1.8 Determinación estado actual de la gestión de mantenimiento aplicada en las locomotoras**

La encuesta para evaluar la gestión de mantenimiento utilizada en los talleres de FEED, fue aplicada a un total de 7 personas relacionadas al tema, entre jefes de taller y responsables de mantenimiento de locomotoras. La encuesta fue puesta a disposición del personal a través de google drive y su ejecución fue de forma anónima. Se logró evaluar 5 áreas de interés referentes a la gestión de mantenimiento y a los indicadores CMD estudiados anteriormente.

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. Se solicitó calificar cada uno de los ítems de acuerdo a la escala mostrada en la Tabla 11-4, para posteriormente realizar una ponderación y diagnóstico de la situación actual de la gestión de mantenimiento.

**Tabla 11-4:** Codificación usada en la encuesta.

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

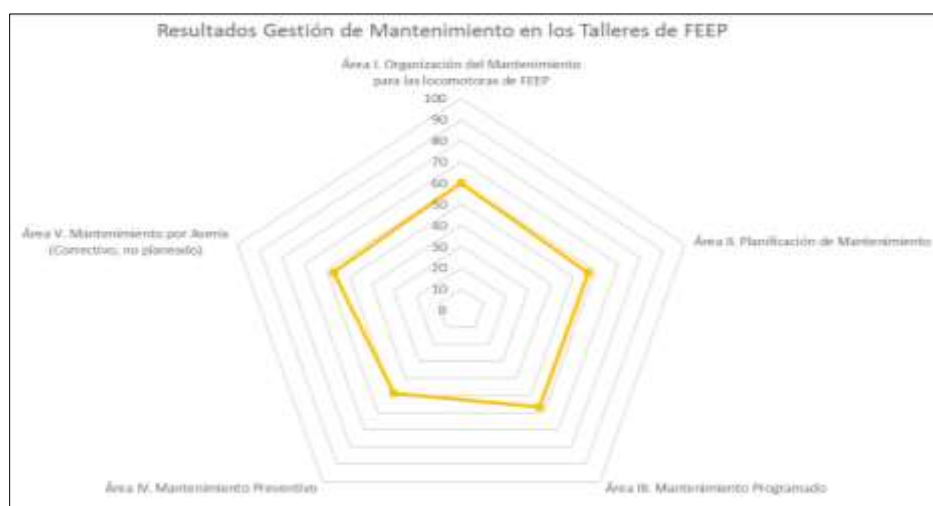
Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

Las respuestas fueron procesadas en una hoja de cálculo xls; los resultados por áreas se presentan en la Tabla 12-4 y se puede realizar un mejor análisis a través del diagrama radar en la Figura 22-4.

**Tabla 12-4:** Resultados de la encuesta para la evaluación de la Gestión de Mantenimiento.

Resultados de la Evaluación de la Gestión de Mantenimiento	Porcentaje Alcanzado Aspecto (100%)	Porcentaje Alcanzado Área (100%)	Brecha	Situación
<b>Área I. Organización del Mantenimiento para las locomotoras de FEEP</b>				
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			
<b>Área II. Planificación de Mantenimiento</b>				
Objetivos y metas	59,05	56,76	43,24	Regular
Políticas para la planificación	52,38			
Control de Evaluación	58,86			
<b>Área III. Mantenimiento Programado</b>				
Planificación del mantenimiento programado	57,14	56,59	43,41	Regular
Programación e Implantación del mantenimiento programado	50,71			
Control y Evaluación del mantenimiento programado	61,90			
<b>Área IV. Mantenimiento Preventivo</b>				
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			
<b>Área V. Mantenimiento por Avería (Correctivo, no planeado)</b>				
Atención a las fallas	56,99	56,99	43,01	Regular
Supervisión y Ejecución	60,26			
Información sobre las averías	60,00			
<b>Total Porcentual Alcanzado</b>		55,78	44,22	Regular

Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.



**Figura 22-4.** Diagrama radar de la Evaluación de la Gestión de Mantenimiento.  
Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

De un total alcanzable del 100%, el puntaje que alcanza la gestión de mantenimiento de FEEP es del 55,78% lo que la ubica en una situación global de “Regular” de acuerdo a la escala utilizada. Del análisis en el diagrama radar se puede concluir que 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.

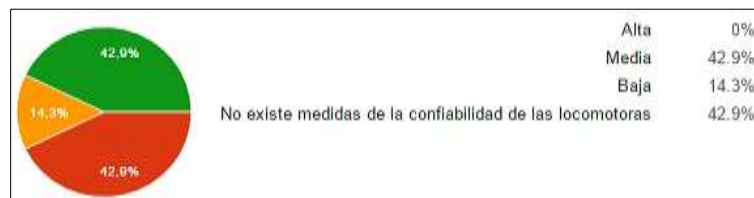


Todas las demás áreas se encuentran muy parejas en puntaje, sin embargo, una calificación de “Regular” como la alcanzada no es adecuada para alcanzar buenos objetivos de mantenimiento, conservar la vida útil de las locomotoras, y asegurar los niveles de disponibilidad de la flota. Por lo tanto, es indispensable la mejora de las áreas con más problemas, esto conllevará a la consecución de un aumento en la disponibilidad de la flota.

#### 4.1.8.1 Información adicional

Para respaldar la evaluación de la gestión de mantenimiento realizada en el apartado anterior, en la encuesta se adicionó nueve preguntas a las 79 que componen el instrumento de evaluación. El objetivo es recabar más información referente al manejo de indicadores CMD y que sea de utilidad para formular la propuesta. Los resultados de cada ítem son los siguientes:

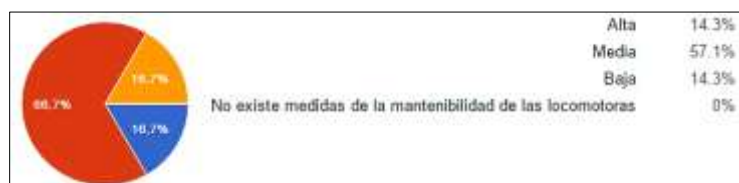
#### Ítem 80. ¿Cuál considera usted es el valor de la confiabilidad durante 2015 de la flota de locomotoras asignadas a su dependencia?



**Figura 23-4.** Resultados pregunta 80 de la encuesta.  
Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

De esta pregunta se puede concluir que la organización de mantenimiento tiene la idea de que la confiabilidad de la flota de las locomotoras es de media a baja y que inclusive parte de los encuestados desconocen sobre este tipo de medición. Esto indica claramente la necesidad de realizar estudios de CMD en la organización de mantenimiento.

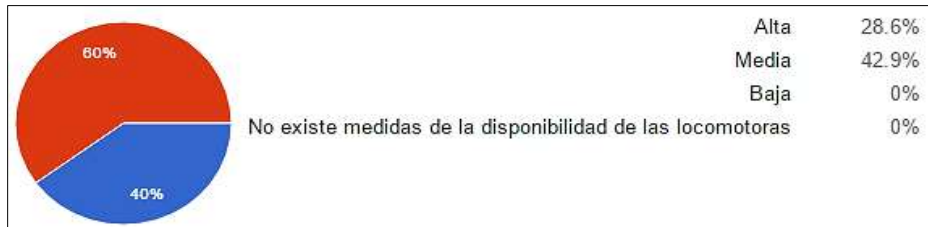
#### Ítem 81. ¿Cuál considera usted es el valor de la Mantenibilidad durante 2015 de la flota de locomotoras asignadas a su dependencia?



**Figura 24-4.** Resultados pregunta 81 de la encuesta.  
Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

Esta pregunta arroja como resultado el que el valor de mantenibilidad que maneja la organización es medio según lo expresa el 57,1% de encuestados. Es indispensable por lo que se demuestra en el estudio CMD el que el valor de mantenibilidad se mantenga constante o disminuya a través del control de los MTTR y Mp.

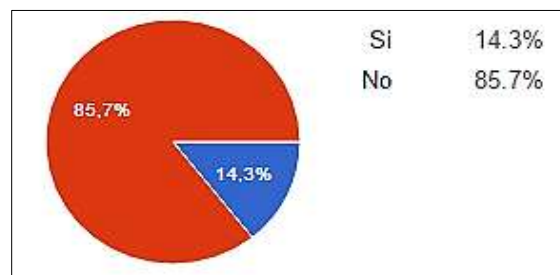
**Ítem 82. ¿Cuál considera usted es el valor de la Disponibilidad durante 2015 de la flota de locomotoras asignadas a su dependencia?**



**Figura 25-4.** Resultados de la pregunta 82 de la encuesta.  
Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

El 42,9% de los encuestados considera que la disponibilidad de las locomotoras es media mientras que un 28,6% la consideran alta y otro 28,6% asegura que no existen medidas de disponibilidad. Como lo demuestra la disponibilidad resultado del estudio CMD es baja por lo que es pertinente la toma de decisiones que conlleve a su aumento.

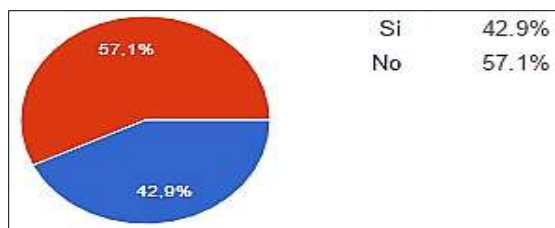
**Ítem 83. ¿Existe en su dependencia estudios de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de la flota de locomotoras de años anteriores a 2015?**



**Figura 26-4.** Respuestas pregunta 83 de la encuesta  
Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

Esta pregunta indica que el 85,7% de los encuestados aseveran que no existen estudios CMD referentes al mantenimiento de las locomotoras mientras que el 14,3% indica que, si existen, por lo que se puede concluir que efectivamente no existe un estudio detallado de CMD en la empresa.

**Ítem 84. ¿Cuenta la organización de mantenimiento con una metodología que permita determinar indicadores de Confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de la flota de locomotoras asignadas a su dependencia?**



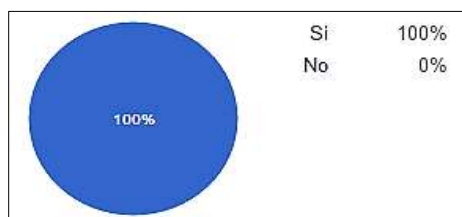
**Figura 27-4.** Resultados de la pregunta 84 de la encuesta.  
Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

En esta pregunta el 42,95% de los encuestados manifiestan que si cuentan con una metodología que permita medir CMD mientras que el 57,1% indican que no cuentan con dicha metodología, lo que refleja muy claramente que la mayoría del personal que dirigen la organización de mantenimiento no realizan una medición CMD y que los que sí lo hacen no cuentan con una metodología regulada ya que esta no se encuentra instaurada dentro de los lineamientos de la gestión.

**Ítem 85. Para su unidad de mantenimiento, ¿cuál sería en porcentaje el valor de disponibilidad a alcanzar en 2016 de la flota de locomotoras asignadas a su dependencia?**

Esta pregunta era de respuesta abierta, entre ellas se mencionan valores de disponibilidad de entre 80 a 99% de disponibilidad a alcanzar como valores ideales a alcanzar en las locomotoras por parte de la organización de mantenimiento.

**Ítem 86. ¿Considera usted que la creación de un plan de gestión de mantenimiento basado en el análisis de índices de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad va a incidir positivamente en los índices de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de las locomotoras tipo BBB 2400 de Ferrocarriles del Ecuador Empresa Pública?**



**Figura 28-4.** Respuestas de la pregunta 86 de la encuesta.  
Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

En esta pregunta se manifiesta que el 100% de los encuestados considera que la creación de un plan de mantenimiento basado en el análisis de índices de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad va a incidir positivamente en los índices de CMD de las locomotoras de la flota.

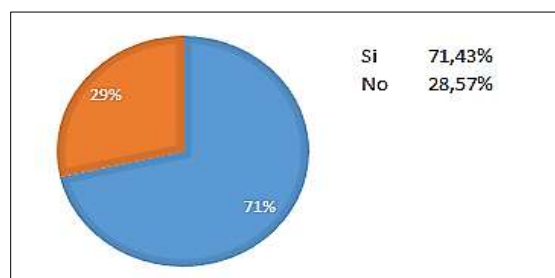
**Ítem 87. ¿Está dispuesto a organizarse administrativamente en base a un plan de gestión de mantenimiento para conseguir mejores resultados en los indicadores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de las locomotoras tipo BBB 2400 de Ferrocarriles del Ecuador Empresa Pública?**

Con unanimidad el 100% de los encuestados manifiesta que si estarían dispuestos a organizarse administrativamente en base a un plan de gestión de mantenimiento para conseguir mejores resultados en los indicadores CMD por lo que es viable el que se adopte una propuesta de mejora en base al análisis de estos indicadores.



**Figura 29-4.** Respuestas de la pregunta 87 de la encuesta.  
Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

**Ítem 88. ¿Considera usted que la Gestión de Mantenimiento aplicada en las locomotoras tipo BBB 2400 puede incidir en la disponibilidad de las locomotoras tipo BBB 2400 de FEPE?**



**Figura 30-4.** Respuestas a la pregunta 88 de la encuesta.  
Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

Las respuestas a esta pregunta de la encuesta indican que el 71,43% de los encuestados manifiestan que la gestión de mantenimiento aplicada a las locomotoras si puede incidir significativamente en la disponibilidad, mientras que el 28,57% dicen que no la afectaría.

#### **4.1.9 Comprobación de la hipótesis**

Para comprobar la hipótesis se relacionará los resultados de las variables estudiadas, la variable dependiente que corresponde a la “Disponibilidad de las locomotoras tipo BBB 2400 de FEEP 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.

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 FEEP 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, lo que se puede contrastar con el hecho de que el análisis de los indicadores CMD indica que el principal problema es la realización de las actividades de mantenimiento preventivo las cuales no logran controlar adecuadamente las fallas de las locomotoras.

Es muy importante entonces el hecho de que luego de este estudio FEEP considere como un factor muy importante a la gestión de mantenimiento ya que se ha demostrado que esta sí afecta significativamente el valor obtenido en los indicadores CMD en la flota de locomotoras de FEEP.

También se observa un evidente desconocimiento en el manejo y tratamiento de estos indicadores por lo que no existen estudios adecuados referente al tema volviéndose primordial entonces la formulación de una propuesta de mejora a la gestión de mantenimiento, encaminada a mejorar los niveles de disponibilidad a través de la creación de un plan de gestión de mantenimiento encaminado a tales fines.

## CAPÍTULO V

### 5. PROPUESTA

#### 5.1 Título de la propuesta

PLAN DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO BASADO EN EL ANÁLISIS DE ÍNDICES DE CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y DISPONIBILIDAD DE LAS LOCOMOTORAS TIPO BBB2400 DE FERROCARRILES DEL ECUADOR EMPRESA PÚBLICA.

#### 5.2 Objetivos

##### 5.2.1 *Objetivo general*

Desarrollar un plan de gestión de mantenimiento basado en el análisis de índices de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de las locomotoras tipo BBB 2400 de Ferrocarriles del Ecuador Empresa Pública.

##### 5.2.2 *Objetivos específicos*

- Utilizar el estudio de CMD para crear estrategias tendientes al mejoramiento de la disponibilidad alcanzada de las locomotoras tipo BBB 2400 de FEED.
- Identificar las unidades y sistemas críticos de la locomotora tipo BBB 2400 que influyan en los indicadores de mantenimiento.
- Optimizar el plan de mantenimiento de las locomotoras tipo BBB 2400.
- Generar procedimientos de actuación para la realización del mantenimiento preventivo y correctivo
- Proponer una metodología para llevar el control de los indicadores de mantenimiento en las locomotoras tipo BBB2400

#### 5.3 Justificación

Luego de haber realizado la investigación y haber probado que la gestión de mantenimiento influye sobre el resultado de los indicadores CMD, es importante el proponer una mejora por lo cual se manifiesta que los principales problemas se encuentran

en el área de mantenimiento preventivo y mantenimiento programado de la gestión de mantenimiento.

El estudio CMD dio como resultado una disponibilidad alcanzada 73,30%, la cual está por debajo de las expectativas de lo deseado por la organización de mantenimiento, además se ha determinado que los principales problemas se dan por el bajo valor alcanzado por los indicadores MTBMc y MTBMp y los altos valores de los indicadores Mp y MTTR lo cual es consecuencia de los problemas existentes en las áreas más deficientes de la gestión de mantenimiento.

Gracias al análisis estadístico de los indicadores, se ha determinado que las actividades de mantenimiento preventivo no están controlando adecuadamente la ocurrencia de las fallas y que los valores de mantenibilidad resultan ser relativamente altos, todo esto se ha determinado causado por las deficiencias de la gestión de mantenimiento en las áreas afectadas y que se mencionaron anteriormente.

Es indispensable el crear un plan de gestión de mantenimiento, que consideré estos resultados por lo cual la presente propuesta se fundamentará, en buscar estrategias de mantenimiento tendientes al incremento de la disponibilidad alcanzada, lo que contribuirá a lograr que la flota de locomotoras de FEEP cumpla a cabalidad con la planificación de las rutas en las que la empresa brinda sus servicios.

#### **5.4 Importancia**

En la actualidad uno de los principales objetivos de mantenimiento, en especial el de aquellas organizaciones encargadas de administrar flotas vehiculares, es el mantener niveles de disponibilidad altos, por lo que la importancia del presente plan de gestión de mantenimiento radica en que estará encaminado a conseguir un aumento en la disponibilidad alcanzada logrando el asegurar el cumplimiento de la planificación del servicio que presta FEEP en el país.

#### **5.5 Alcance**

El plan de gestión de mantenimiento propuesto en esta investigación, está encaminada a solucionar problemas referentes al mantenimiento de las ocho locomotoras diésel eléctricas GEC ALSTHOM tipo BBB 2400, detectados durante la investigación, teniendo

como objetivo principal el generar estrategias de mantenimiento tendientes a mejorar la disponibilidad alcanzada.

## **5.6 Fundamentación teórica**

El plan de gestión de mantenimiento se basa en las siguientes herramientas de la ingeniería de mantenimiento las cuales son mundialmente aceptadas y aplicadas en toda industria en donde se realiza gestión de mantenimiento.

### **5.6.1 *Análisis de Pareto***

Este análisis permite seleccionar por orden de importancia y magnitud, las causas o problemas que se deben investigar hasta llegar a conclusiones que permitan eliminarlos de raíz (Torres, 2010 pág. 28).

El análisis consiste en que la mayoría de problemas son producidos por un número pequeño de causas, y estas son las que se interesa descubrir y eliminar para lograr un efecto de mejora. A través del diagrama de Pareto, es posible graficar por orden de importancia, el grado contribución de las causas que se está analizando o el conjunto de problemas a estudiar y que se busca eliminar para dar solución a las fallas del equipo (Torres, 2010 pág. 28).

Con este método se puede detectar los sistemas que más problemas están causando al conjunto y se puede priorizar la solución a través de tareas de mantenimiento, este diagrama es el primer paso para eliminar las averías importantes del equipo.

En el diagrama de Pareto se presentan claramente la magnitud relativa de los problemas y se suministra a los encargados de mantenimiento una base de información común sobre la cual trabajar.

### **5.6.2 *Análisis de modos de fallas, efectos y criticidad (FMECA)***

El análisis FMECA, es muy empleado en la planeación del mantenimiento centrado en confiabilidad ya que permite lograr el entendimiento global del sistema, su funcionamiento y la forma en la cual puedan presentarse las fallas (Aguilar Otero, y otros, 2010 pág. 16).

Mediante el análisis de fallas se pueden detectar en forma preventiva, predictiva o anticipada cualquier anomalía que pudiera ocurrir en la funcionalidad del equipo. El



análisis en cuestión es un proceso sistémico que permite identificar las fallas potenciales o reales de diseño, de funcionamiento y de proceso, inclusive antes de que ocurran, con la intención de eliminarlas o controlarlas (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 327).

Las acciones de recomendación derivadas de un FMECA quedan definidas como acciones o tareas de mantenimiento y esto es lo que permite formar estrategias completas de mantenimiento aplicando criterios de riesgo y así asegurar que el plan de mantenimiento es aplicado en los equipos que representen un mayor riesgo para las personas, medio ambiente, producción e instalación (Mora Gutiérrez, 2009 pág. 240).

### **5.6.3 Indicadores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad**

En lo referente a indicadores CMD se utilizará la disponibilidad alcanzada por lo que se expuso en los capítulos anteriores de la investigación; esto es debido además a que este tipo de disponibilidad es ideal para controlar las tareas planeadas de mantenimiento y las correctivas por separado.

La disponibilidad alcanzada usa como parámetros de cálculo, MTBM, MTBMc, MTBMp, Mp, y  $\overline{M}$ , la expresión que mide esta disponibilidad es la ecuación [ 12 ] citada anteriormente.

**MTBM** es el tiempo medio entre mantenimientos

**MTBMc** es el tiempo medio entre mantenimiento correctivos

**MTBMp** es el tiempo medio entre mantenimientos preventivos

$\overline{M}$  es el tiempo medio de mantenimiento activo

**MTTR** es el tiempo medio para realizar una reparación

**Mp** es el tiempo neto medio para ejecutar tareas proactivas de mantenimientos planeados

## **5.7 Descripción de la propuesta**

La propuesta se organiza en función de las áreas de la gestión de mantenimiento evaluadas a la organización encargada del mantenimiento de las locomotoras. Se hace énfasis además en la mejora de las áreas que han alcanzado menor puntaje luego de la evaluación.

## **5.7.1 Área I: organización del mantenimiento para las locomotoras de FEEP**

### *5.7.1.1 Creación y organización del departamento de mantenimiento*

La organización de mantenimiento debe ser diseñada para que pueda contemplar la totalidad de las actividades bajo su responsabilidad con un desempeño eficiente y eficaz. Cada departamento de mantenimiento está diseñado para cada una de las filiales que estarán a su cargo tomando en cuenta además que las locomotoras muchas veces son compartidas entre filiales para lograr cumplir con las rutas designadas, por lo que se debe contemplar que todos los departamentos de mantenimiento creados, tengan la misma capacidad operativa.

Es pertinente mencionar que deben tenerse en cuenta que dentro del amplio espectro de funciones de mantenimiento coexistirán elementos de gestión (supervisión y control) y operativos (Torres, 2010 pág. 252).

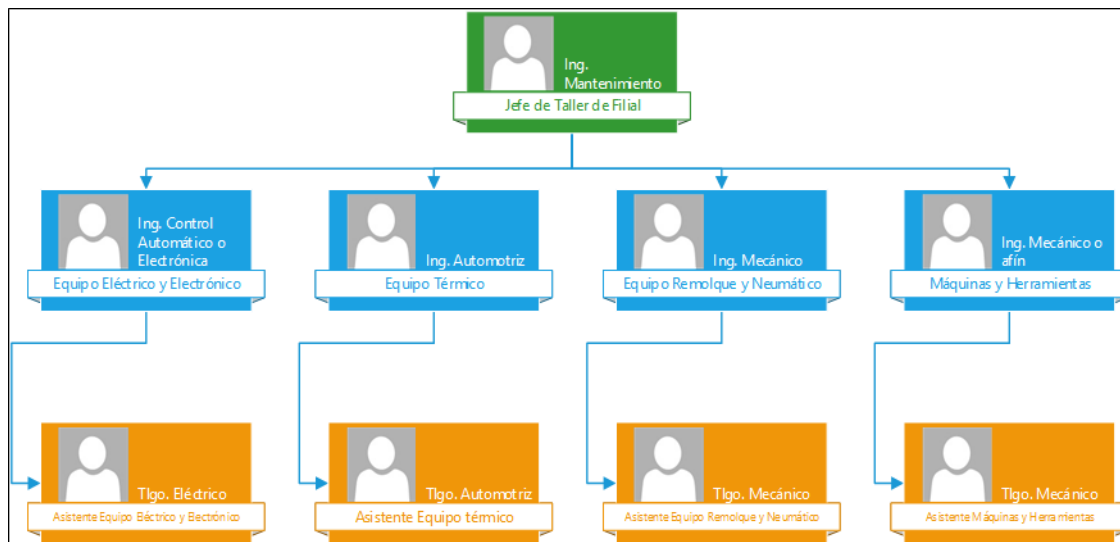
Para diseñar la estructura organizativa de la organización se consideraron los siguientes parámetros:

- Responsabilidad, autoridad y rol de cada persona a involucrarse en el área
- Establecimiento de relaciones entre ellas
- Comprender que los objetivos de mantenimiento de disponibilidad deben ser interpretados y entendidos por todos
- Establecimiento de sistemas de coordinación y comunicación entre las personas
- Especialidades en áreas específicas ya que cada sistema de la locomotora así lo requiere

La organización propuesta para la función de mantenimiento, luego del análisis de los resultados de la investigación, una entrevista con el jefe de proyectos de turno, y las consideraciones previas, se estableció en acuerdo el organigrama presentado en la Figura 1-5. En el organigrama se detalla el personal sugerido para ejecutar una buena gestión de mantenimiento de las locomotoras diésel eléctricas en cada una de las filiales de FEEP y se explica además el campo de formación con el que deben ser seleccionados.

### *5.7.1.2 Funciones y responsabilidades de la función de mantenimiento*

La organización de Mantenimiento que se propone, tiene la responsabilidad de cumplir con las siguientes funciones y responsabilidades:



**Figura 1-5.** Organigrama de la función de mantenimiento de las locomotoras.  
Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

- Mantener las locomotoras en su máxima eficiencia de operación y disponibilidad
- Reducir al mínimo los tiempos de paro ya sea por mantenimiento correctivo como preventivo.
- Investigar las causas y proponer soluciones para fallas que causen paros no programados.
- Planear y coordinar la distribución del trabajo acorde con la fuerza laboral disponible.
- Llevar a cabo inspecciones sistemáticas de todas las locomotoras y sus sistemas con intervalos de control preestablecidos para detectar oportunamente cualquier anomalía, generando y manteniendo los registros adecuados.
- Efectuar reparaciones de emergencia en períodos de tiempo reducidos, con el empleo de métodos previamente analizados.
- Desarrollar y optimizar continuamente los programas de mantenimiento preventivo.
- Seleccionar, capacitar y entrenar al personal de mantenimiento.

Para ello la función de mantenimiento, organizada de acuerdo al organigrama presentado en la Figura 1-5 requiere que cada uno de sus integrantes cumpla con las siguientes funciones y responsabilidades individuales.

**Jefe de taller de filial:**

Es el máximo nivel jerárquico dentro de la función de mantenimiento, es el encargado de la organización, planificación y control del mantenimiento de las locomotoras en el taller, así como de la medición de los indicadores CMD de mantenimiento y la optimización de los planes de mantenimiento. Se ha sugerido que el perfil sea el de un Ing. de Mantenimiento o afín. El jefe de taller tiene a su cargo el siguiente personal:

**Encargados de especialidad y asistentes:**

**Encargado del equipo eléctrico y electrónico.** - Será el que se encargue de la ejecución del mantenimiento del equipo eléctrico y electrónico de la locomotora. Deberá cumplir con lo establecido en el plan de mantenimiento y la planificación de las actividades designadas por el jefe de taller. Deberá registrar toda la información referente al mantenimiento en los formatos especificados. Se sugiere que el perfil sea el de un Ing. en Control Automático o Electrónico.

**Asistente del Encargado del equipo eléctrico y electrónico.** - Sus funciones son de apoyo al encargado de mantenimiento del equipo eléctrico y electrónico. Se sugiere que el perfil sea el de un Tecnólogo Electrónico.

**Encargado del Equipo Térmico.** - Sus funciones son encargarse de la ejecución del mantenimiento del equipo térmico de la locomotora. Deberá cumplir con lo establecido en el plan de mantenimiento y la planificación de las actividades designadas por el jefe de taller. Deberá registrar toda la información referente al mantenimiento en los formatos especificados. Se sugiere que el perfil sea el de un Ing. Automotriz.

**Asistente del encargado del equipo térmico.** - Sus funciones son de apoyo al encargado del equipo térmico. Se sugiere que su perfil sea de Tecnólogo Automotriz o afín.

**Encargado del equipo de remolque y neumático.** - Las funciones de este encargado son las de la ejecución del mantenimiento del equipo de remolque y neumático de la locomotora. Deberá cumplir con lo establecido en el plan de mantenimiento y la planificación de las actividades designadas por el jefe de taller. Deberá registrar toda la información referente al mantenimiento en los formatos especificados. Se sugiere que el perfil sea el de un Ing. Mecánico.

**Asistente del Encargado del equipo de remolque y neumático.** – Sus funciones son de apoyo al encargado del equipo de remolque y neumático. Se sugiere que el perfil sea el de un Tecnólogo Mecánico.

**Encargado del Área de Máquinas y Herramientas.** - Las funciones de este encargado serán la de realizar todos los trabajos referentes al uso de máquinas y herramientas de precisión. Se sugiere el perfil de un Ing. Mecánico o afín.

**Asistente del Encargado del área de Máquinas y Herramientas.** - Las funciones de este asistente serán de apoyo al encargado de Máquinas y Herramientas. Se sugiere el perfil de un Tecnólogo Mecánico o afín.

## **5.7.2 Área II: planificación del mantenimiento**

### **5.7.2.1 Objetivos de la planificación**

Los objetivos que persigue la planificación del mantenimiento son los siguientes:

- Planificar, coordinar y supervisar las actividades de mantenimiento correctivo y de los planes de mantenimiento programado, para asegurar la funcionalidad, la máxima disponibilidad y eficiencia de las locomotoras.
- Asegurar la ejecución ordenada y eficaz en el tiempo de todas las actividades de mantenimiento contenidas en los planes de mantenimiento programado
- Precisar la priorización de los sistemas para la realización de mantenimiento correctivo y preventivo con el fin de incrementar la confiabilidad de las locomotoras mediante el control de las fallas recurrentes.
- Asistir al proceso logístico para la realización del mantenimiento a fin optimizar los tiempos de reparación y realización de mantenimiento, logrando mejorar la mantenibilidad de las locomotoras a fin de asegurar las operaciones ferroviarias de FEED.

### **5.7.2.2 Políticas para la planificación**

Los lineamientos en los que se basa la planificación del mantenimiento para las locomotoras son los siguientes

- La organización de mantenimiento debe garantizar el proveer oportuna y eficientemente los servicios de mantenimiento tanto preventivo como correctivo,

necesarios para las locomotoras mediante una adecuada planificación del mantenimiento.

- Definir claramente la priorización de las locomotoras y sus sistemas, que requieran de mantenimiento a través de estudios periódicos.
- Elaborar programas anuales de mantenimiento preventivo para las locomotoras diésel eléctricas en función de estudios previos.
- Mantener un flujo de información adecuado entre todos los departamentos que requieren del funcionamiento de las locomotoras a fin de maximizar la disponibilidad y no entorpecer las actividades ferroviarias.
- Coordinar, orientar y apoyar las actividades del personal adscrito al área de su competencia.
- Registrar la información debida y necesaria en los medios de información establecidos con el fin de realizar mejoras posteriores en los procesos de planificación.
- Manejar adecuadamente la documentación técnica designada para el efecto (planes de mantenimiento, órdenes de reparación, manuales técnicos, registros de mantenimiento, etc.) para que las actividades de mantenimiento planificadas se ejecuten adecuadamente.

### **5.7.3 *Área III. Mantenimiento programado***

El presente plan de gestión tiene como objetivo el maximizar el nivel alcanzado por los indicadores CMD por lo que es de vital importancia el establecer lineamientos para garantizar el funcionamiento continuo y adecuado de cada una de las locomotoras objeto de mantenimiento.

Actualmente durante el desarrollo de la investigación se determinó que no existe los procedimientos a seguir para la realización de la planificación y programación de mantenimiento programado, por lo que la mejora que se propone para esta área se fundamenta en los procedimientos a seguir para la planificación, programación y ejecución de este tipo de mantenimiento.

La formulación de estos procedimientos, se ha hecho con la finalidad de abarcar procedimientos generales para las ocho locomotoras a cargo de la función de

mantenimiento, tanto las actividades de control como las actividades técnicas están en función de los planes de mantenimiento preventivo los cuales deben procurar el objetivo de controlar las fallas y la maximización de los indicadores de confiabilidad.

El procedimiento del mantenimiento programado consiste en la ejecución adecuada del plan de mantenimiento preventivo adoptado por la organización. Esto tiene especial influencia en los indicadores MTBMP y Mp, por lo que su adecuado diseño de gestión y posterior adopción serán de vital importancia para los resultados finales en lo que tiene que ver con la maximización de la disponibilidad alcanzada.

Para conseguir ejecutar un programa de mantenimiento preventivo y además también el correctivo, es necesario contar con información previa desde la cual partir para la planificación, por lo que es necesario generar primero el procedimiento para el mantenimiento rutinario, proceso que será el encargado de generar dicha información.

#### *5.7.3.1 Procedimiento para el mantenimiento rutinario*

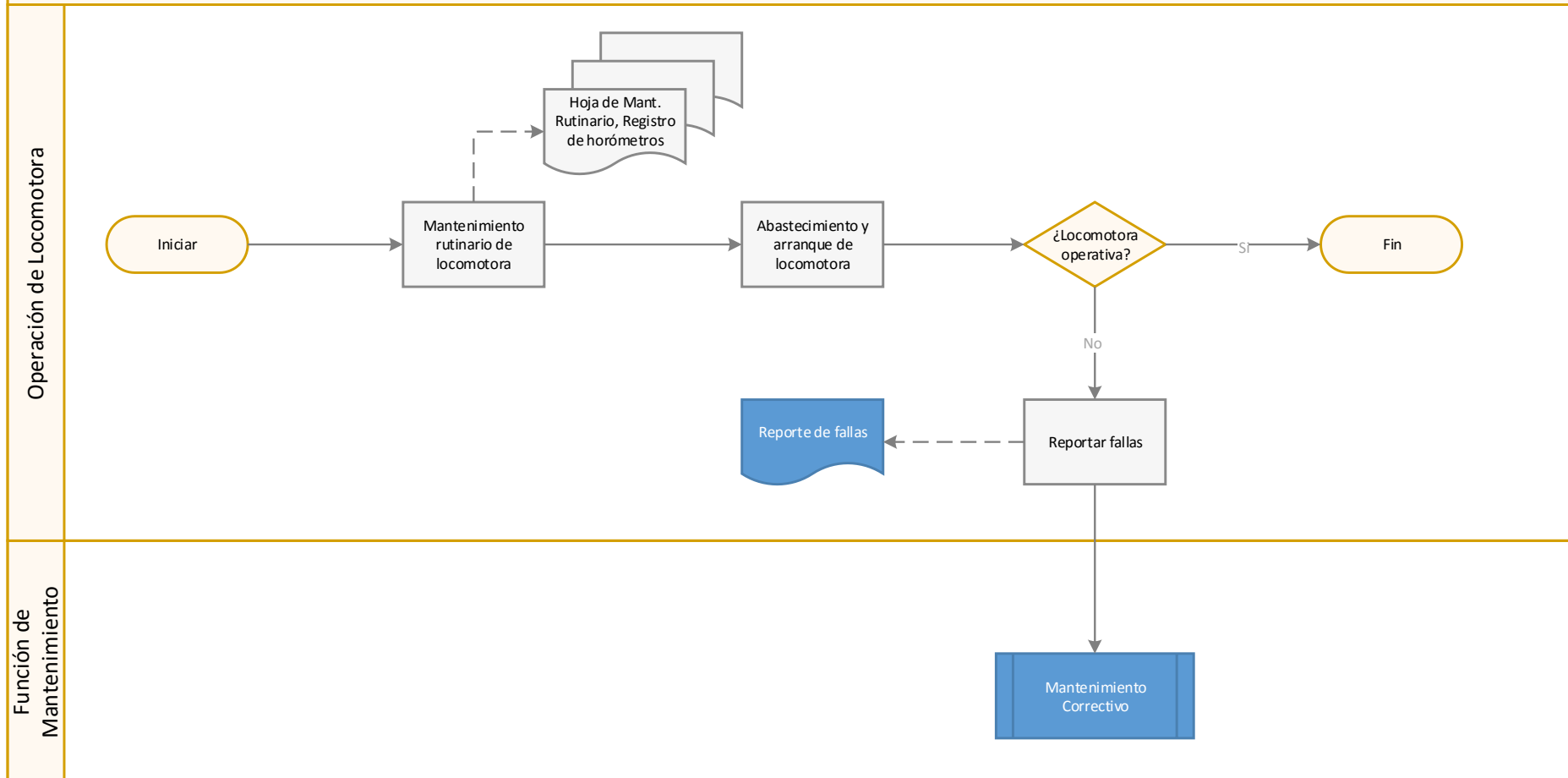
El mantenimiento rutinario es un tipo de mantenimiento que se realizará cada vez que una de las locomotoras vaya a entrar en operación, es un tipo de mantenimiento básico compuesto por una serie de comprobaciones e inspecciones del tipo preventivas.

El objetivo de este mantenimiento es la detección de fallas y el registro de información que servirá luego para la planificación, programación y ejecución de los mantenimientos de tipo preventivo programado y correctivo. El procedimiento que se debe seguir se especifica en el diagrama de flujo presentado en la Figura 2-5.

Luego de la ejecución de estas actividades, se termina con el abastecimiento y arranque de la locomotora para juzgar si está operativa o si se ha producido una falla en el funcionamiento.

Si está operativa, el proceso termina y se procederá con el recorrido, caso contrario se generará un reporte de falla dirigido al departamento de mantenimiento quienes serán los encargados de ejecutar el procedimiento especificado de mantenimiento correctivo.

## Mantenimiento Rutinario y detección de fallas



**Figura 2-5.** Proceso de mantenimiento rutinario y detección de fallas en las locomotoras.  
Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M



### *5.7.3.2 Consideraciones para la aplicación del mantenimiento rutinario*

Para conseguir una aplicación eficaz del mantenimiento rutinario, es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las tareas de mantenimiento rutinario se deben realizar bajo el procedimiento indicado en los formatos preestablecidos.
- El registro de la información de los horómetros debe ser lo más confiable posible y realizada en el instante especificado ya que esta información es la más importante para lograr el éxito en la ejecución del mantenimiento preventivo.
- La información que se registre en los reportes de falla debe ser reportada a tiempo a fin de prevenir consecuencias inaceptables por causa de las fallas
- Coordinar con el departamento de mantenimiento los recursos necesarios para la realización de las actividades de mantenimiento rutinario tales como materiales e insumos de limpieza.
- Las inspecciones rutinarias se deben realizar con absoluta responsabilidad y concentración.
- Debe existir la capacitación adecuada al personal operador en cuanto a la operación y funcionamiento de las locomotoras para que puedan aplicar adecuadamente los formatos preestablecidos y realizar las actividades de mantenimiento rutinario guardando las debidas medidas de seguridad.

### *5.7.3.3 Procedimiento para la planificación, programación y ejecución del mantenimiento programado*

A través del diagrama de flujo presentado en la Figura 3-5, se muestra todo el procedimiento para la realización de las actividades de mantenimiento programado, esto contempla planificación, ejecución y control. Se especifica claramente los documentos que se requiere manejar, así como el personal que interviene en todo el proceso.

El proceso se explica a continuación:

#### **Planificación (jefe de taller):**

El proceso comienza con la revisión de los registros de horómetros, los cuales son generados en el proceso de mantenimiento rutinario, la información que se utiliza es la que se encuentra en los registros de horómetros.

El jefe de taller revisará los planes de mantenimiento preventivo y comparará las horas cumplidas por las locomotoras, cuando estas cumplan o estén a punto de cumplir con el número de horas de trabajo sugeridas en el plan, se procederá a la revisión de las tareas de mantenimiento a cumplirse para proceder a programarlas para su ejecución además de los recursos necesarios para su cumplimiento.

**Programación (Jefe de Taller):**

Una vez definidas las actividades de mantenimiento a realizarse, se debe programar una fecha de realización, para esta actividad el jefe de taller debe considerar el tiempo disponible, la carga de trabajo, la capacidad de producción del taller, la programación de las rutas de las locomotoras, el aprovisionamiento de los materiales, repuestos, y disponibilidad de equipos y herramientas.

Una vez definida la programación se debe proceder a generar la solicitud de repuestos y la correspondiente orden de trabajo, asegurándose de ejecutar todos los trámites correspondientes para que todo lo necesario se encuentre disponible para la fecha de realización programada.

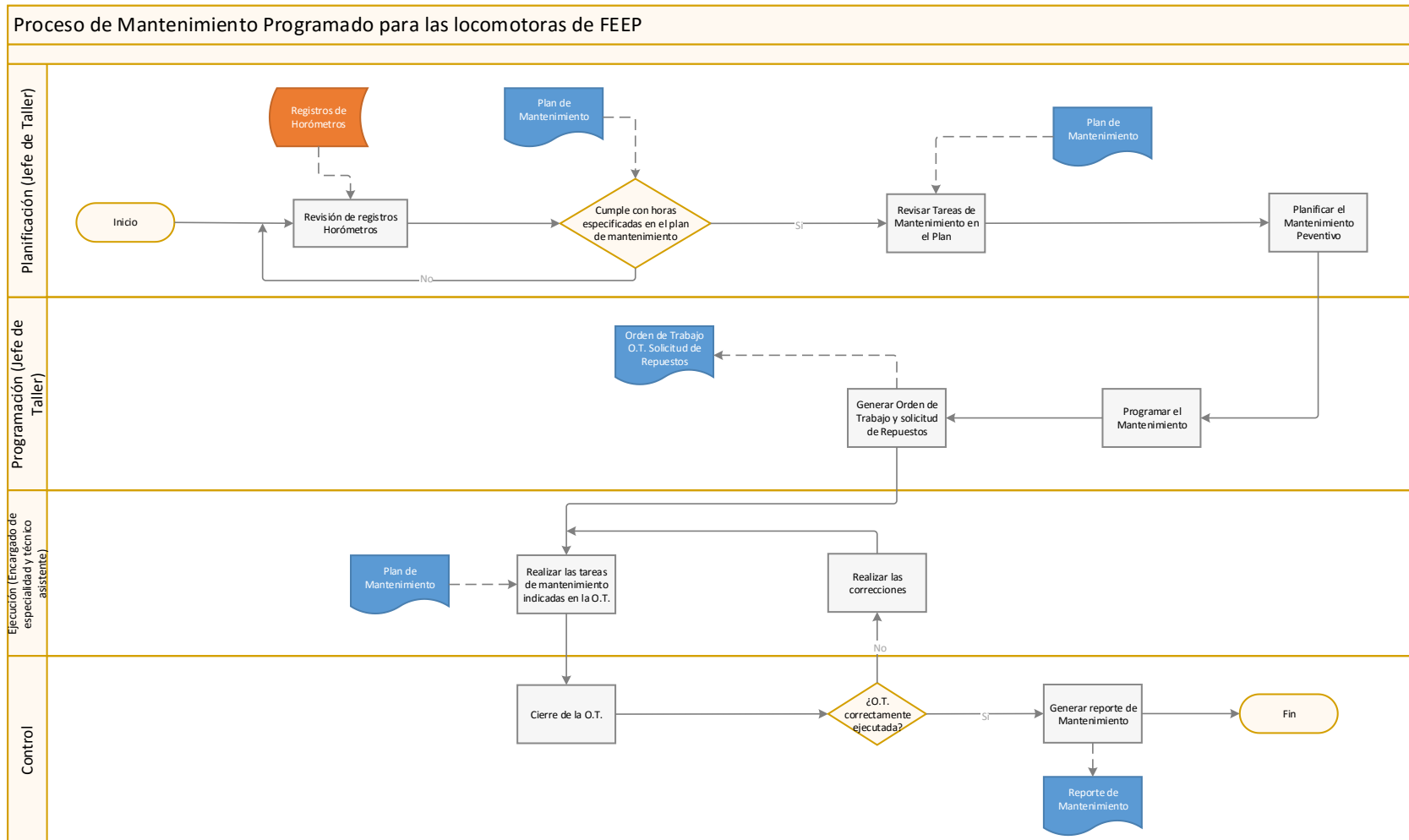
**Ejecución de Mantenimiento (Encargado de especialidad y Asistente):**

El encargado de cada especialidad de mantenimiento, será el procurador de la ejecución de las tareas de mantenimiento designadas en la orden de trabajo, debe cumplirlas a cabalidad coordinando con su asistente y con los otros encargados de especialidad a fin de que las tareas sean cumplidas eficazmente y en el tiempo de mantenimiento acordado.

Durante esta operación se debe seguir los procedimientos especificados en el plan de mantenimiento, los cuales corresponden a instrucciones de mantenimiento y reparación recomendadas por el fabricante.

**Control (Encargado de especialidad, Jefe de Taller):**

Una vez concluidas las tareas de mantenimiento se debe proceder a cerrar la orden de trabajo, acción en la cual se verificará que la ejecución de las tareas de mantenimiento haya resultado eficaz.



**Figura 3-5.** Proceso de mantenimiento programado para las locomotoras de FEOP.  
 Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

La acción de cierre de orden de trabajo estará a cargo exclusivamente del encargado de la especialidad en conjunto con el jefe de taller, quienes verificarán que las acciones de mantenimiento de la orden se hayan cumplido correctamente. Luego del cierre el Jefe de Taller se encargará de generar un reporte de mantenimiento, en el cual se especifique las tareas de mantenimiento correctamente ejecutadas.

#### *5.7.3.4 Consideraciones para la aplicación del mantenimiento preventivo programado*

Para una ejecución eficiente del mantenimiento preventivo propuesto, debe considerarse las siguientes recomendaciones:

- Se deben procurar lograr que las actividades de mantenimiento preventivo sean ejecutadas en el tiempo especificado por el plan de mantenimiento, debiendo evitar que se pasen de las horas recomendadas.
- La información y documentos que se maneja en el área, debe fluir adecuadamente entre todos los involucrados.
- La información debe ser almacenada digitalmente en la nube y las notificaciones a través de correos electrónicos procuran que todos los miembros involucrados tengan acceso a la misma.
- La información sobre los procedimientos técnicos para el mantenimiento preventivo debe estar contenida en el plan de mantenimiento con toda la información referente a instrucciones técnicas, insumos, materiales, herramientas con los tiempos de reparación para cada actividad.
- Los reportes de mantenimiento programado deben respaldar las actividades ejecutadas con sus respectivas observaciones. La información incluida sobre tiempos de reparación y horómetros debe ser fiable ya que esta servirá para la gestión de los indicadores CMD.
- Los planes de mantenimiento preventivo deben ser mejorados continuamente a través de las herramientas de la ingeniería de mantenimiento y los indicadores CMD, esto debe ser atendido por el Área IV de mantenimiento preventivo.

#### *5.7.4 Área IV. Mantenimiento preventivo*

Para la presente propuesta, la función del área del mantenimiento preventivo será uno de los pilares importantes para la consecución de los objetivos de mantenimiento, en este

caso la mejora de la disponibilidad se conseguirá gracias a las mejoras continuas que se puedan hacer en esta área.

La función del área será el de optimizar los planes de mantenimiento a través de métodos sugeridos y del estudio de los indicadores CMD. Por definición de acuerdo a la norma COVENIN 3049-93, el mantenimiento preventivo utiliza todos los medios disponibles incluyendo estadísticos para generar planes de mantenimiento con objetivos tales como el adelantarse a la aparición o a predecir las fallas.

En la propuesta se dispone que sea en esta área en donde se genere el plan de mantenimiento a adoptar con la respectiva metodología para la mejora continua basándose en el estudio de los indicadores CMD y el análisis de fallas para la optimización de los planes de mantenimiento, los cuales serán los que posteriormente sean en los que se base el mantenimiento programado.

El funcionamiento adecuado de esta área de la gestión, es de vital importancia para el modelo propuesto, ya que a través de él se podrá generar las estrategias para conseguir las mejoras deseadas en confiabilidad, mantenibilidad y la disponibilidad alcanzada.

El objetivo del área es que por medio de mejores planes de mantenimiento, estrategias para el control de las fallas, y mejores procedimientos que se determinen del análisis, se podrá controlar los indicadores MTBM y  $\overline{M}$ , indicadores de confiabilidad y mantenibilidad a mejorar para conseguir incrementar la disponibilidad alcanzada.

#### *5.7.4.1 Procedimiento para la aplicación de mejoras de mantenimiento preventivo*

El procedimiento estará a cargo de la unidad de movilidad y mecánica, departamento que será el encargado de revisar la información proveniente de cada filial para realizar el análisis que se propone en la Figura 4-5. El procedimiento se detalla a continuación:

- El proceso se recomienda que se lo haga mensualmente, comienza a partir del proceso de medición CMD, para el cual se puede utilizar la metodología estadística planteada en el capítulo III de la presente investigación. La información a analizar se encuentra en los registros de mantenimiento de cada taller.
- La decisión tiene que ver con la evolución de la disponibilidad en el tiempo, por lo cual se debe determinar si se está logrando su incremento o lo contrario. Si la

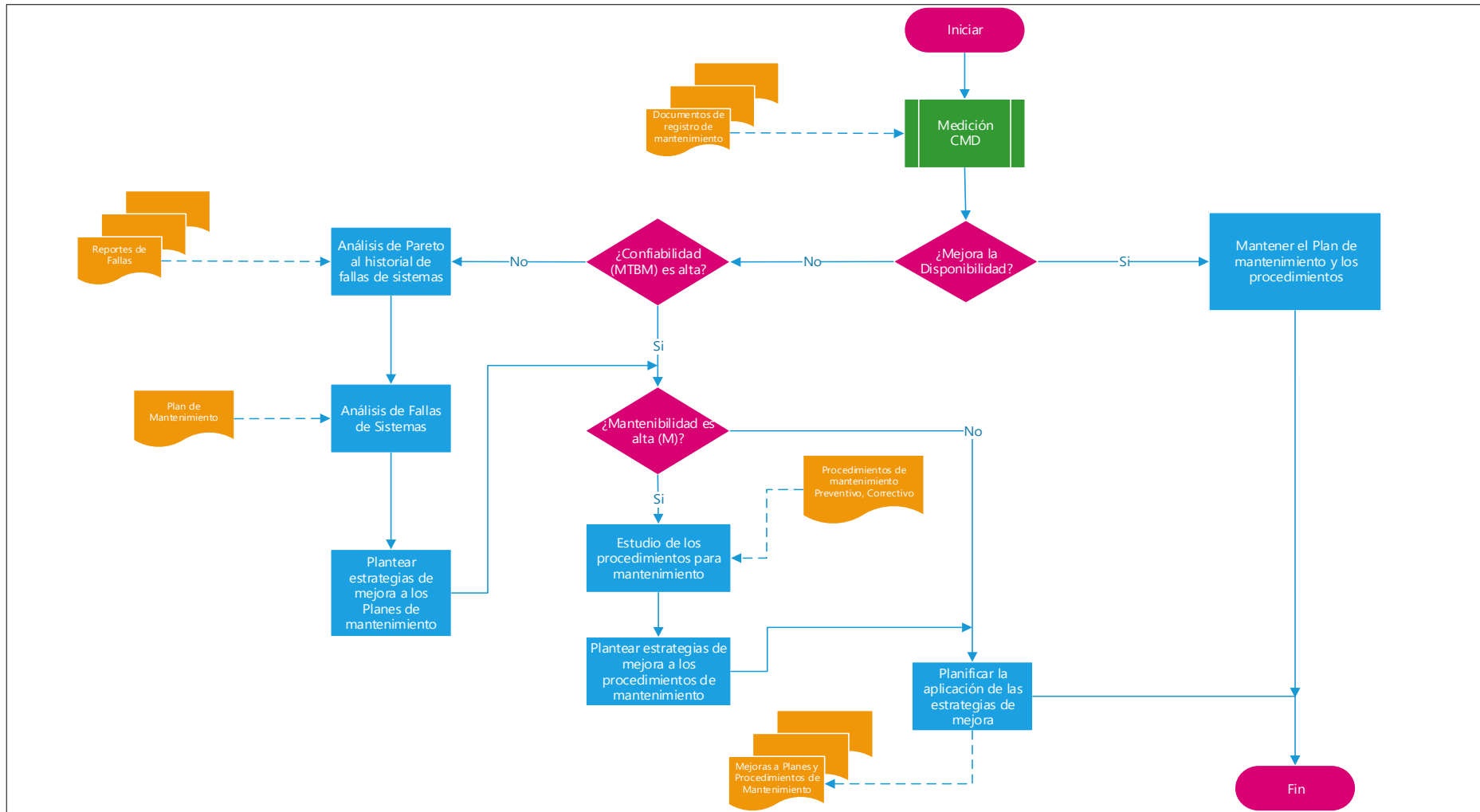
disponibilidad se está incrementando o es aceptable entonces se decide mantener la aplicación del plan de mantenimiento y los procedimientos sugeridos para cada área.

- Si la disponibilidad no se está incrementando y se divisa un decremento, se procederá a realizar el análisis de los indicadores de confiabilidad MTBM y mantenibilidad  $\overline{M}$ .
- Se comenzará por el análisis de confiabilidad a través del indicador MTBM. Si este es alto se procederá con el análisis de la mantenibilidad, de lo contrario se procederá a realizar un análisis de Pareto a las locomotoras para determinar los sistemas que están siendo las causas vitales de los problemas.
- Posteriormente se realiza un análisis de fallas en los sistemas determinados para formular estrategias de mejora al plan de mantenimiento a fin de evitar las fallas recurrentes.
- Concluido el análisis de la confiabilidad se procede a analizarla mantenibilidad, en esta se analizará el indicador  $\overline{M}$ . Si este es bajo lo que quiere decir que los tiempos de mantenimiento son más rápidos se pasa a la siguiente etapa de planificación.
- Si los valores del indicador  $\overline{M}$  por lo contrario se han incrementado quiere decir que los tiempos de reparación, están siendo más altos por lo que se procede con el estudio de los procedimientos de mantenimiento, con la premisa de descubrir cuáles pueden ser las causas del aumento de los tiempos de mantenimiento y el plantear estrategias de mejora para dichos procedimientos.
- Una vez concluidos los análisis de los indicadores se debe planificar la aplicación de las estrategias de mejora a fin de optimizar el plan de mantenimiento y sus procedimientos de aplicación.

#### *5.7.4.2 Consideraciones para la aplicación del procedimiento*

Para que el procedimiento propuesto de mejora de los planes de mantenimiento tenga el éxito deseado, se debe tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- La información debe estar correctamente respaldada y ordenada en un servicio de la nube. No se recomienda que todos los miembros posean la clave de la cuenta



**Figura 4-5.** Procedimiento para la aplicación de mejoras en el mantenimiento preventivo  
 Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

principal, sino que más bien se use el recurso de archivos compartidos con cuentas individuales y el uso de correos institucionales.

- La información que se maneje debe estar actualizada en todo momento ya que se requiere que el análisis este actualizado.
- Debe existir una adecuada comunicación entre los departamentos participantes, en este caso la unidad de movilidad y mecánica de FEEP y sus talleres de mantenimiento.
- Se debe llevar un historial de la evolución que van teniendo los indicadores en el tiempo que lleve la aplicación del nuevo sistema de gestión de mantenimiento a fin de controlar si se están consiguiendo los objetivos deseados.
- Los análisis y propuestas de mejora que se propongan deben ser realizados con el apoyo técnico del caso, tomando en cuenta las opiniones y sugerencias de todos los miembros que participen en el proceso de mantenimiento.
- Al planificar la aplicación de una propuesta de mejora, ya sea al plan de mantenimiento o a los procedimientos, estos deben ser debidamente socializados a fin de que las acciones a tomar sean exitosas.

#### **5.7.5 Área V. Mantenimiento por avería (correctivo)**

El mantenimiento correctivo son las acciones de mantenimiento que se ejecutan para el tratamiento de las averías, es ideal que las averías vayan desapareciendo en el tiempo, acción que es controlable a través del mantenimiento preventivo programado, sin embargo, el mantenimiento correctivo es de características inevitables debido al desgaste y uso de los sistemas por lo que debe ser adecuadamente gestionado cuando este aparezca.

Con una correcta gestión en el mantenimiento correctivo se puede controlar los indicadores MTBMc y MTTR, la mejora en la confiabilidad se da en corregir correctamente las fallas para que estas no reaparezcan a través de procedimientos de reparación eficientes y la mejora en la mantenibilidad se da con un adecuado proceso de gestión en el cual se optimicen todos los recursos de los que se disponen.

Durante la investigación se pudo conocer que no está claramente definido el procedimiento para llevar a cabo las tareas de mantenimiento correctivo, por lo que la propuesta sugiere una gestión en la que se desarrollen las actividades de planificación, programación, ejecución y control del mantenimiento correctivo con el personal de mantenimiento propuesto y la documentación sugerida.



### *5.7.5.1 Procedimiento para la planificación, programación, ejecución y control del mantenimiento correctivo para las locomotoras*

El procedimiento sugerido se muestra en el diagrama presentado en la Figura 5-5, y a continuación se detallan cada una de las funciones, personal ejecutante y los documentos requeridos. Se debe destacar que la información de reportes de fallas, horómetros entre otras se generó previamente en el procedimiento de mantenimiento rutinario.

#### **Planificación del mantenimiento correctivo (Jefe de Taller):**

La primera actividad que se realiza es responsabilidad del jefe de taller, se debe contar con los reportes de falla los cuales deberán ser revisados para programar una asistencia que posteriormente determine si se trata de una falla de solución inmediata, caso contrario se realice la actividad de análisis de la situación en la que mediante los manuales de mantenimiento que se posee se defina las actividades de reparación necesarias así como los repuestos, materiales y el tiempo que tomará y el personal que debe ejecutarlas.

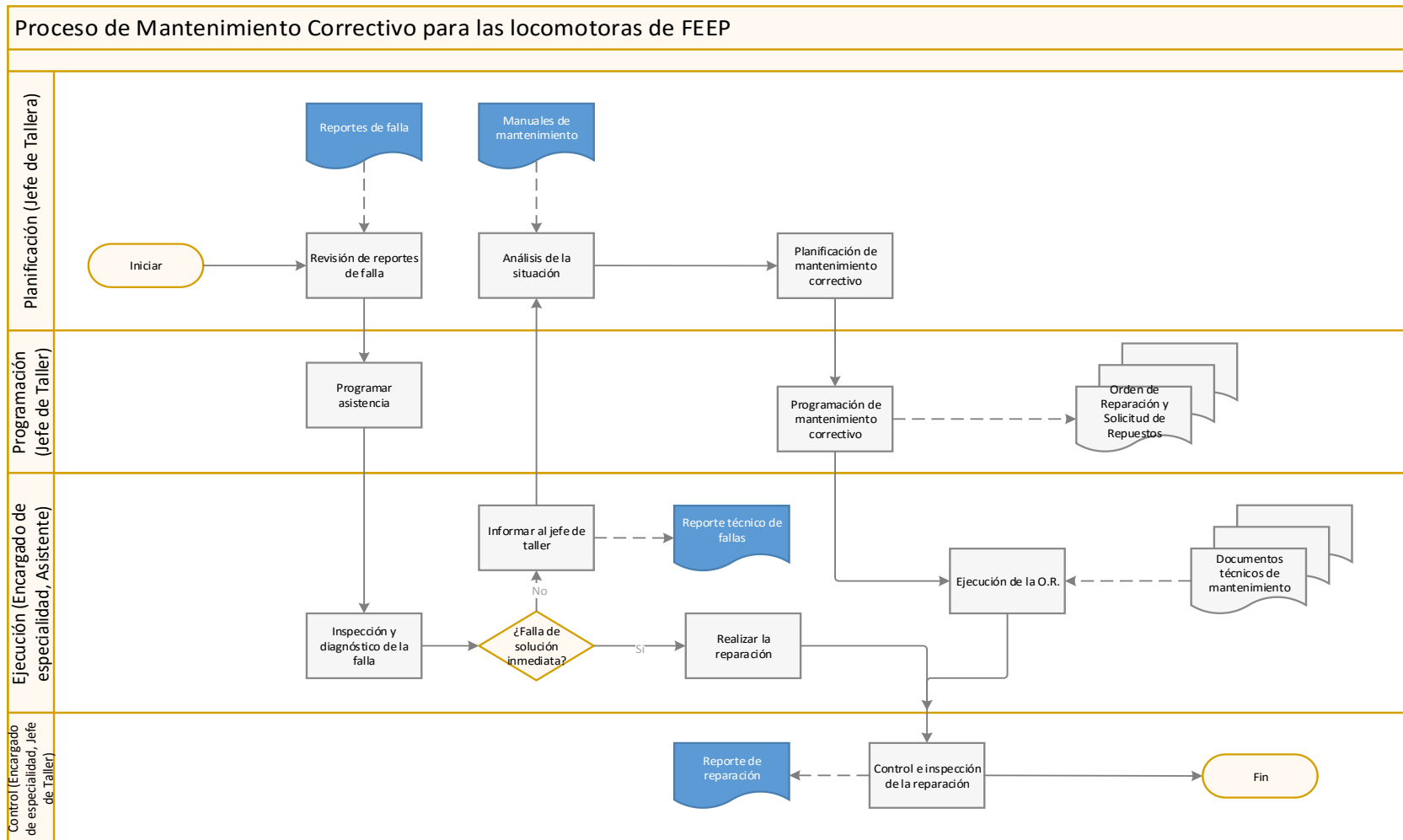
#### **Programación del mantenimiento correctivo (Jefe de Taller):**

La programación se realiza en dos instancias, la primera es luego de la revisión de los reportes de falla, ejecutándose la programación de asistencia cuando se ha detectado una falla en los reportes. Para la realización de esta programación deben considerarse aspectos como la carga de trabajo, la especialidad del técnico, los insumos y materiales, así como también las herramientas.

La otra actividad de planificación de acuerdo al diagrama de flujo, se la realiza cuando la falla no es posible repararla de forma inmediata por lo que se procede al análisis de la situación y la planificación de mantenimiento correctivo, llegando a la programación en donde se generará la correspondiente orden de trabajo y solicitud de repuestos.

#### **Ejecución (Encargado de especialidad, Asistente)**

Los encargados de cada especialidad y sus asistentes serán el personal encargado de ejecutar las tareas de mantenimiento correctivo. En primer lugar, luego de ser programados para dar asistencia a fallas en la locomotora, deberán proceder a la inspección y diagnóstico de la falla determinando si puede ser reparada de inmediato con los recursos de los que se dispone.



**Figura 5-5.** Procedimiento para la gestión del mantenimiento correctivo de las locomotoras.

Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

Si las fallas que se han diagnosticado requieren un proceso de reparación más laborioso y complejo, así como de materiales y recursos no disponibles al momento el encargado de especialidad debe informar al jefe de taller a través de un reporte técnico de fallas para que este proceda con el análisis de la situación, la planificación y programación del mantenimiento correctivo.

Posteriormente a la programación de mantenimiento correctivo y una vez procesada la solicitud de repuestos y generado la orden de reparación, los encargados de especialidad deberán ejecutar las acciones correctivas designadas de acuerdo a los documentos técnicos de mantenimiento y las instrucciones de reparación formuladas en la planificación.

#### **Control del mantenimiento correctivo (Jefe de Taller y Encargado de especialidad):**

El control del cumplimiento de las actividades de mantenimiento correctivo y la calidad de resultados se lo realizará durante y luego de concluir ya sea con las reparaciones de fallas inmediatas o del cumplimiento de una orden de reparación.

La responsabilidad de este control e inspección de los trabajos estará a cargo del jefe de taller y los encargados de especialidad designados para los trabajos. Finalmente realizarán un reporte de reparación que respalde la realización de los trabajos.

#### **Consideraciones para la aplicación del procedimiento de mantenimiento correctivo**

Para lograr aplicar adecuadamente el procedimiento de mantenimiento correctivo de acuerdo al diagrama de flujo propuesto en la Figura 5-5, la organización de mantenimiento debe cumplir las siguientes recomendaciones:

- Se debe mantener una buena comunicación entre las áreas y departamentos involucrados.
- Quienes se encarguen de las actividades de mantenimiento deben ser capacitados continuamente en todas las actividades de mantenimiento.
- La información técnica para el mantenimiento y los procedimientos generados, deben ser lo más detallados posibles.
- Las órdenes de trabajo deben poseer la información necesaria acerca de las actividades de mantenimiento correctivo con sus respectivos tiempos de reparación.

- Para el flujo de información se deben manejar la información digitalmente a través del almacenamiento en la nube con una organización adecuada y el manejo de correos electrónicos.
- Trabajo en equipo adecuado.
- Se debe asegurar que se disponga de las herramientas, repuestos y materiales necesarios para poder arrancar con el mantenimiento correctivo y este sea eficaz.
- Almacenar y analizar las fallas para prevenir futuras apariciones.
- La información que se genere en los reportes de mantenimiento correctivo deben manejar una información confiable para lograr gestionar adecuadamente los indicadores CMD.

#### ***5.7.6 Mejoras sugeridas a los planes de mantenimiento para mejorar confiabilidad y mantenibilidad***

Se ha demostrado en la presente investigación que, uno de los principales problemas para los bajos niveles de disponibilidad, tienen que ver con los indicadores de confiabilidad MTBMc y MTBMp, así como los elevados valores en la mantenibilidad mostrado en los indicadores MTTR y Mp, por lo cual se sugiere aplicar las mejoras listadas a continuación.

##### ***5.7.6.1 Mejoras en la confiabilidad***

El análisis de los indicadores demostró que las acciones de mantenimiento preventivo no están logrando controlar adecuadamente la aparición de fallas, motivando el apareamiento de las paradas por causas de mantenimiento correctivo.

Esta propuesta aplicará el procedimiento formulado en el Área IV de Mantenimiento Preventivo para la mejora de la confiabilidad.

El primer paso debe ser detectar cuales son los sistemas que son los causantes de la mayor parte de los problemas, para esto se aplicará el análisis de Pareto con la información recogida de los registros de mantenimiento, en el tiempo especificado de estudio.

## Análisis de Pareto de los sistemas de la locomotora

El análisis se realiza determinando las frecuencias de fallas causadas en los sistemas de la locomotora revisando y cuantificando la información que se encuentra en los registros de mantenimiento.

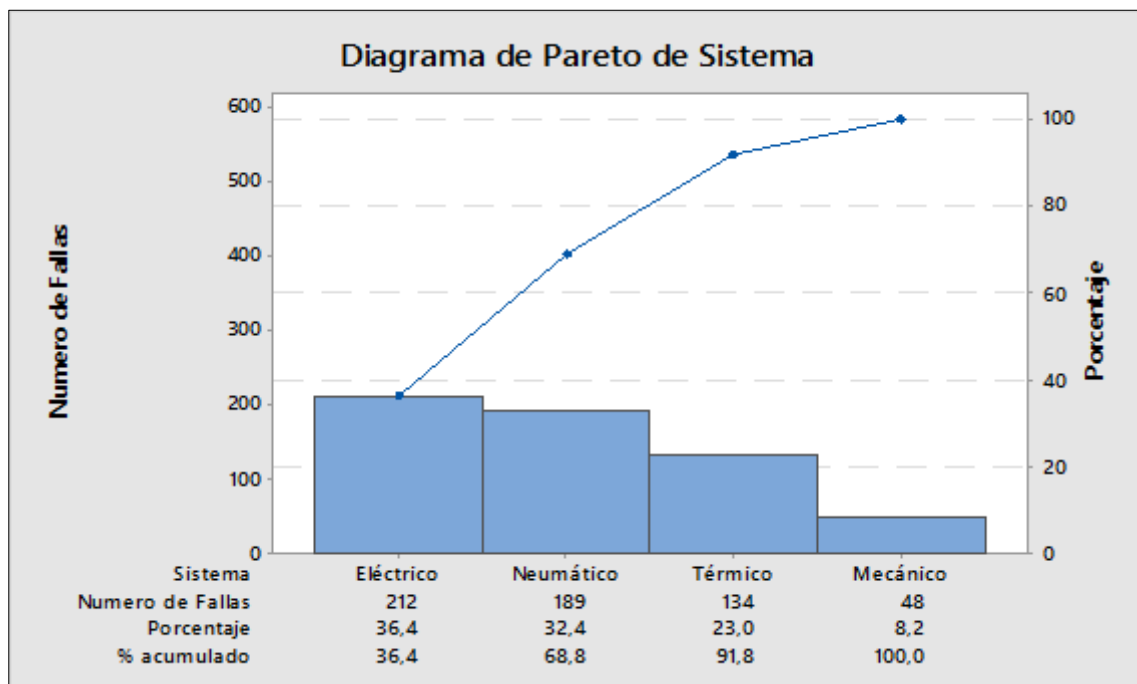
**Tabla 1-5:** Número total de fallas de locomotoras por sistema.

LOCOMOTORA	SISTEMA			
	Eléctrico	Mecánico	Neumático	Térmico
2403	49	13	25	19
2408	12	1	11	9
2409	19	8	59	11
2406	59	12	58	30
2402	14	5	18	22
2404	8	2	4	1
2405	34	2	6	14
2407	17	5	8	28
<b>TOTAL</b>	212	48	189	134

Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

Fuente: (FEEP, 2014)

Luego se calculan las frecuencias relativas y acumuladas para trazar el diagrama de Pareto en el cual se podrá realizar un análisis completo y determinar los sistemas responsables de la mayor parte de mantenimientos correctivos.



**Figura 6-5.** Análisis de Pareto de los sistemas de las locomotoras.

Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

## **Análisis de los Resultados**

En la Figura 6-5, se muestran los resultados del análisis de Pareto, de la cual se pueden deducir las siguientes conclusiones:

- Los sistemas eléctrico y neumático de las locomotoras, son responsables del 80% de las fallas que han sido objeto de mantenimiento correctivo durante el período investigado.
- Las fallas en los sistemas térmico y mecánico han tenido un menor impacto en ser causantes de una baja confiabilidad de la flota con un 20% de incidencia.
- Se debe tomar acciones de mejora con respecto a los sistemas eléctrico y neumático para lograr una mejora significativa de la confiabilidad. Se debe analizar las fallas causadas en estos sistemas para determinar cuáles son recurrentes y cómo controlar su apareamiento.

## **Análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad, causantes de una baja confiabilidad en las locomotoras**

Luego del diagnóstico inicial obtenido del análisis de Pareto, y de acuerdo al procedimiento establecido para las acciones de mejora en el mantenimiento preventivo, se procederá a realizar el análisis FMECA de los sistemas que afectan la confiabilidad de las locomotoras de FEED.

El objetivo del análisis es el generar estrategias de mantenimiento preventivas que optimicen los planes de mantenimiento, ya sea con la incorporación de tareas de mantenimiento o la modificación de las frecuencias de mantenimiento.

Estas modificaciones deben ser tendientes a eliminar los modos de falla recurrentes y en su defecto lograr el incremento del indicador MTBM, MTBMc, estabilizando además el indicador MTBMp.

El análisis se realizará en dos etapas, en la primera se identificará los subsistemas, las funciones, los modos y los efectos de falla. En la segunda se determinará la criticidad de las fallas a través de una matriz de categorización de riesgo para evaluar modos de falla, detectando además su ocurrencia, detectabilidad, efecto y su correspondiente valor NPR.

**Tabla 2-5:** Modos y Efectos de Fallas del sistema eléctrico.

EQUIPO/SUBSISTEMA	COMPONENTE	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTO DE FALLA	
Circuito de Potencia	Alternador principal	Transformar la energía mecánica del motor en energía eléctrica para la alimentación de los motores de tracción	El alternador no genera energía	Anillos Colectores desconectados	El alternador no genera energía. Locomotora parada	
				Porta escobillas desconectados	El alternador no genera energía. Locomotora parada	
				Falla del cojinete de rodillos cilíndricos	El alternador no gira eficientemente para generar energía. Locomotora parada	
				Desgaste de escobillas	El alternador no genera energía. Locomotora parada	
				Deficiencia en las conexiones de anillos colectores y escobillas	El alternador no genera energía. Locomotora parada	
	Intensidad baja del alternador 535 A				Deficiencia en las conexiones de anillos colectores y escobillas	El alternador no genera la intensidad suficiente para generar la fuerza tractiva. Locomotora sin potencia
					Anillos Colectores desconectados	El alternador no genera la intensidad suficiente para generar la fuerza tractiva. Locomotora sin potencia
					Porta escobillas desconectados	El alternador no genera la intensidad suficiente para generar la fuerza tractiva. Locomotora sin potencia
	Motores de Tracción	Transforman energía eléctrica del alternador en fuerza tractiva para dar movimiento a los bogies de la locomotora		El motor no genera fuerza tractiva	Desgaste en los contactores que comandan el motor	El motor no genera fuerza tractiva para mover la locomotora. Locomotora parada.
					Desconexión del cableado de los motores de tracción	El motor no genera fuerza tractiva para mover la locomotora. Locomotora parada.
Falla en Escobillas y porta escobillas					El motor no genera fuerza tractiva para mover la locomotora. Locomotora parada.	
Patinaje de motor de tracción				Falta de lubricación en la caperuza de eje-cojinetes	El motor no gira libremente y se produce patinaje	

				Falta de lubricación del piñón y engranajes de la transmisión	El motor no gira libremente y se produce patinaje
				Frenos aplicado en las ruedas constantemente	El motor no gira libremente y se produce patinaje
				Deficiencia en las conexiones de los motores de tracción	El motor no gira libremente y se produce patinaje
	Inversores J20, J21	Invertir el sentido de la corriente en los inductores para cambiar el sentido de desplazamiento de las locomotoras	El inversor no invierte el sentido de la corriente en los inductores para cambiar el sentido de desplazamiento de las locomotoras	Mal funcionamiento en los relés inversores	Los inversores no invertirán el sentido de giro correctamente. Locomotora no se puede conducir.
				Deficiencia en las conexiones del circuito inversor	Los inversores no invertirán el sentido de giro correctamente. Locomotora no se puede conducir.
				Desgaste de las bases de relés inversores	Los inversores no invertirán el sentido de giro correctamente. Locomotora no se puede conducir.
	Contactores ATP	Equipar los circuitos de potencia con tensiones de potencia de 750V	Los contactores no equipan los circuitos de potencia con tensiones de potencia de 750V	Falta de grasa conductriz en las plaquitas de plata de los contactos	El equipamiento eficaz a los circuitos de potencia con tensiones requeridas puede no ser inmediato
				Trazas de carbonización que alteran la superficie externa de los obturadores	Se impide un equipamiento eficaz a los circuitos de potencia con tensiones requeridas
				Falla de la bobina de mando de contactor	Se impide un equipamiento eficaz a los circuitos de potencia con tensiones requeridas
				Rotura o despegue de las plaquitas de cerámica	Se impide un equipamiento eficaz a los circuitos de potencia con tensiones requeridas
	Manipulador	Aseguran la selección del sentido de marcha y el mando de tracción o frenado	No asegura la selección del sentido de marcha	Desgaste de los contactos eléctricos	No se asegura el cierre adecuado del circuito que comanda el sentido de marcha a seleccionar
				Resortes flojos o rotos	No se asegura el cierre adecuado del circuito que comanda el sentido de marcha a seleccionar



				Cableado defectuoso	No se asegura el cierre adecuado del circuito que comanda el sentido de marcha a seleccionar
				Atasco en el mecanismo de selección	No se asegura el cierre adecuado del circuito que comanda el sentido de marcha a seleccionar
			No asegura la selección de la tracción o frenado	Resortes flojos o rotos	No se asegura el cierre adecuado del circuito que comanda la selección de frenado
				Atasco en el mecanismo de selección	No se asegura el cierre adecuado del circuito que comanda la selección de frenado
				Desgaste de los contactos eléctricos	No se asegura el cierre adecuado del circuito que comanda la selección de frenado
			Circuitos referentes al motor	Statodyne	Alimentar la excitación del alternador principal y carga la batería
Bloque rectificador defectuoso	No se produce la tensión adecuada para la carga de la batería				
Batería en mal estado	La batería no almacena la carga				
Cableado y protecciones defectuoso	No se asegura el cierre del circuito para proveer carga a la batería				
No alimenta la excitación del alternador principal	Bandas flojas	No gira adecuadamente la statodyne para producir energía			
	Cableado protecciones y contactores defectuosos	No se asegura el cierre del circuito para proveer de excitación al alternador principal			
	Falta de aislamiento en los embobinados inducidos	Se puede producir cortos en este elemento			
	Bloque rectificador defectuoso	No se produce la tensión adecuada para la excitación del alternador principal			
	Falta de lubricación en cojinetes	No gira adecuadamente la statodyne para producir energía			

	Arranque	Girar el motor diésel para que arranque	El motor de arranque no gira	Desgaste en los contactores que comandan el motor	El motor no genera fuerza tractiva para mover el motor diésel	
				Desconexión del cableado de los motores de tracción	El motor no genera fuerza tractiva para mover el motor diésel	
				Falla en Escobillas y porta escobillas	El motor no genera fuerza tractiva para mover el motor diésel	
			El motor de arranque se queda encendido	Contadores se quedan pegados	Quema los motores de arranque	
				El motor arranque no tiene potencia suficiente para girar el motor diésel	Falta de lubricación en la caperuza de eje-cojinetes	El motor no gira libremente y se produce la falta de potencia y consumo de corriente alto
					Falta de lubricación del piñón y engranajes de la transmisión	El motor no gira libremente y se produce la falta de potencia
					Baja intensidad proveniente de las baterías	El motor no genera fuerza tractiva suficiente para mover la locomotora
	Deficiencia en las conexiones de los motores de arranque	La excitación del motor no es adecuada lo que provoca su deficiencia				
	Control electromagnético de Ventilador.	Comandar el accionamiento electromagnético del ventilador para refrigeración.	El ventilador no es activado	Cableado del circuito de control deficiente	El motor diésel no se refrigerará adecuadamente	
				Contactores desgastados o flojos	El motor diésel no se refrigerará adecuadamente	
				Relés de control defectuosos	El motor diésel no se refrigerará adecuadamente	
	Módulo sensor de velocidad	Sensor la velocidad de giro del motor diésel para habilitar las funciones como encendido, ralentí, frenado eléctrico, sobre velocidad.	No se habilita funciones de la locomotora.	Deficiencia en el cableado y protecciones de la tarjeta de control	No se puede activar las funciones de la locomotora indicadas para cada velocidad del motor diésel. Tarjeta puede sufrir un corto.	
La unidad de control no funciona			Falta de alimentación a la tarjeta de control por relés	La función de habilitación de funciones de la locomotora no se ejecuta adecuadamente.		

				Falla del sensor de velocidad del motor diésel	La función de habilitación de funciones de la locomotora no se ejecuta adecuadamente.
				Falla de la Unidad de control	La función de habilitación de funciones de la locomotora no se ejecuta.
Circuitos de iluminación y cabina	Luces interiores	Iluminar interiormente los sectores de la locomotora	Luces no se encienden	Circuito de control defectuoso	Inseguridad en la operación
				Bombillo quemado	Inseguridad en la operación
	Luces exteriores	Iluminar exteriormente los sectores de la locomotora	Luces no se encienden	Circuito de control defectuoso	Inseguridad en la conducción
				Bombillo quemado	Inseguridad en la conducción
	Bocinas	Alertar con sonido la presencia de la locomotora	Bocina no suena	Circuito de control defectuoso	Inseguridad en la conducción
				Bombillo quemado	Inseguridad en la conducción
	Pictogramas	Informar de la operación	Pictograma no informa de la operación	Circuito de control del pictograma defectuoso	Inseguridad en la operación.
	Circuito de Frenado	Frenado reostático	Crear una fuerza de frenado en los motores de tracción para disminuir la velocidad de la locomotora	Freno reostático no produce fuerza de frenado para disminuir la velocidad de la locomotora	Contactores desgastados o flojos
Relés de control defectuosos					La activación del freno reostático no se llevará a cabo
Cableado defectuoso					La activación del freno reostático no se llevará a cabo
Control de Freno automático		Comandar la activación del freno neumático	No se comanda la activación del freno neumático	Relés defectuosos	La activación del freno automático no se llevará a cabo
				Cableado defectuoso	La activación del freno automático no se llevará a cabo
				Escape de aire con la electroválvula bajo tensión o sin tensión	La activación del freno , no será eficaz
				Baja resistencia de la bobina de la electroválvula comandadora	La activación del freno , no será eficaz

Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

**Tabla 3-5:** Modos y Efectos de Fallas del sistema Neumático.

EQUIPO/SUBSISTEMA	COMPONENTE	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFEECTO DE FALLA
Compresor	Bandas de transmisión	Transmitir el movimiento del motor hasta el compresor	No se transmite eficazmente el movimiento del motor al compresor	Bandas flojas	El compresor no producirá aire comprimido con eficiencia
				Bandas desgastadas	El compresor no producirá aire comprimido con eficiencia
	Filtro	Filtrar el aire que ingresa al compresor	Sobrecarga del compresor	Filtro tapado	El compresor se sobrecarga para producir el aire requerido
	Válvulas	Permitir o cerrar el paso del aire a los cilindros.	Pérdida de eficacia del compresor	Mal asentamiento de válvulas	Baja compresión, incremento de temperatura, pérdida de rendimiento a los sistemas neumáticos
	Empaque	Sellar la estanqueidad de las cámaras de compresión	Fugas de aire por el empaque	Empaque desgastado	Cambio de empaque, pérdida de rendimiento.
	Rines	Sellar la estanqueidad entre cilindro y pistón	Fugas por los rines	Rines desgastados	Cambio de rines, desarmado del compresor, pérdida de rendimiento
Válvulas de control y cañerías	Válvulas de control	Permitir o cerrar el paso del aire a los circuitos hidráulicos	Escape de aire	Válvula no se cierra	Sobrecarga a los sistemas, no se puede controlar los sistemas
			Retención de aire	Válvula no se abre	No se puede activar los sistemas.
	Cañerías de circuitos neumáticos.	Transportar el aire comprimido a través de los circuitos neumáticos para los aditamentos que usen energía neumática	Pérdida de rendimiento del compresor y los equipos neumáticos	Fugas en las cañerías de los circuitos neumáticos.	No se puede controlar eficazmente los sistemas neumáticos, desperdicio de energía neumática. Falla en los frenos neumáticos

Equipo de frenado	Freno continuo automático	Frenar las ruedas de los boguies de acuerdo a las acciones sobre la palanca de mando de frenado	No se produce la acción de frenado deseada en la locomotora	Válvulas de accionamiento defectuosas	Pérdida de eficacia en el frenado. Riesgo en la conducción
				Cañerías de freno con fugas	Pérdida de eficacia en el frenado. Riesgo en la conducción
				Depósito de equilibrio con fugas	Pérdida de eficacia en el frenado. Riesgo en la conducción
	Freno neumático directo	Actuar con fuerza de frenado directamente sobre las ruedas	No se produce la acción de frenado directo deseada en la locomotora al accionarlo	Válvulas de accionamiento defectuosas	Pérdida de eficacia en el frenado. Riesgo en la conducción
				Cañerías de freno con fugas	Pérdida de eficacia en el frenado. Riesgo en la conducción
	Freno de estacionamiento	Inmoviliza la locomotora actuando sobre 6 cilindros de freno	No se acciona el freno de estacionamiento	Cilindros neumáticos de freno defectuoso	No se inmoviliza la locomotora. Inseguridad en la parada de la locomotora
			Cuña no asegura los cilindros de freno	Cuña desgastada del cilindro de freno	No se inmoviliza la locomotora. Inseguridad en la parada de la locomotora
			No se acciona el freno de estacionamiento	Circuito de frenado con fuga	No se inmoviliza la locomotora. Inseguridad en la parada de la locomotora

**Realizado por:** Ing. Luis F. Buenaño M.

### **Primera Etapa: Subsistemas, Modos y Efectos de Fallas.**

Los análisis que se presentan en este trabajo fueron realizados en conjunto con los técnicos de la empresa FEEP, por lo que reflejan exactamente los modos de falla que ocurren en las locomotoras de FEEP. En primer lugar, se detalla el componente del sistema, la función, la falla funcional, el modo de falla y los efectos generados en la operación de la locomotora.

Los Subsistemas, Modos y Efectos de Fallas se pueden apreciar en la Tabla 2-5 para el sistema eléctrico y Tabla 3-5 para el neumático.

### **Segunda etapa: Criticidad de fallas**

La criticidad es una característica de un sistema que representa el impacto de la falla en cuanto a seguridad, ambiente o producción del proceso al cual pertenece, pudiendo ubicarse en niveles altos, medios y bajos. La categorización de fallas se realiza determinando el valor de NPR (Número prioritario de riesgo) (Placencia Urrutia, 2014).

El cálculo corresponde a:

$$NPR = Ocurrencia \times Detectabilidad \times Efectos \quad [30]$$

A continuación, se establecen escalas de evaluación que se ajusten adecuadamente a la empresa, y al plan de gestión de mantenimiento propuesto. Los parámetros a evaluar son:

- Ocurrencia de la falla
- Detectabilidad
- Efectos

La ocurrencia de la falla se analiza en función de los históricos de falla y la detectabilidad en base al conocimiento aportado por los técnicos especialistas de FEEP, el producto de ambos da lugar a la frecuencia para la matriz de criticidad. El valor de los efectos es resultado de la sumatoria de la evaluación de las siguientes categorías:

- Seguridad y Salud Ocupacional
- Medio Ambiente
- Costos de Mantenimiento
- Impacto a la producción
- Impacto a la Calidad
- Tiempo Medio de Reparación

**Tabla 4-5:** Criticidad de los modos de falla del sistema eléctrico.

EQUIPO/ SUBSISTEMA	COMPONENTE	MODO DE FALLA	OCURRENCIA	DETECTABILIDAD	FRECUENCIA						RPN	CATEGORIZACIÓN
					SSO	AMB	REP	PROD	MTR	TOTAL		
Circuito de Potencia	Alternador principal	Anillos Colectores desconectados	3	2	3	1	1	5	2	12	72	BAJO
		Portaescobillas desconectados	1	3	3	1	1	5	2	12	36	BAJO
		Falla del cojinete de rodillos cilíndricos	4	4	4	2	3	5	4	18	288	ALTO
		Desgaste de escobillas	2	2	3	1	1	3	2	10	40	BAJO
		Deficiencia en las conexiones de anillos colectores y escobillas	2	2	2	1	1	4	2	10	40	BAJO
		Deficiencia en las conexiones de anillos colectores y escobillas	2	2	2	2	1	3	2	10	40	BAJO
		Anillos Colectores desconectados	1	3	1	2	1	4	2	10	30	BAJO
		Portaescobillas desconectados	5	4	4	2	3	4	3	16	320	ALTO
	Motores de Tracción	Desgaste en los contactores que comandan el motor	2	2	3	1	1	4	2	11	44	BAJO
		Desconexión del cableado de los motores de tracción	2	2	3	1	1	5	2	12	48	BAJO
		Falla en Escobillas y Portaescobillas	3	3	2	1	1	5	2	11	99	MEDIO
		Falta de lubricación en la caperuza de eje-cojinetes	3	3	2	2	1	4	2	11	99	MEDIO
Falta de lubricación del piñón y engranajes de la transmisión		4	3	2	2	1	4	2	11	132	MEDIO	

		Frenos aplicados constantemente en las ruedas	2	2	2	2	1	4	2	11	44	BAJO
		Deficiencia en las conexiones de los motores de tracción	5	4	4	2	1	4	3	14	280	ALTO
	Inversores J20, J21	Mal funcionamiento en los relés inversores	4	3	2	1	1	5	2	11	132	MEDIO
		Deficiencia en las conexiones del circuito inversor	4	3	2	1	1	5	2	11	132	MEDIO
		Desgaste de las bases de relés inversores	1	3	2	1	1	5	2	11	33	BAJO
	Contactores ATP	Falta de grasa conductriz en las plaquitas de plata de los contactos	1	3	3	1	1	5	1	11	33	BAJO
		Trazas de carbonización que alteran la superficie externa de los obturadores	2	2	3	1	1	4	2	11	44	BAJO
		Falla de la bobina de mando de contactor	3	3	3	1	1	4	2	11	99	MEDIO
		Rotura o despegue de las plaquitas de cerámica	2	2	2	1	1	4	2	10	40	BAJO
	Manipulador	Desgaste de los contactos eléctricos	5	4	5	1	1	5	3	15	300	ALTO
		Resortes flojos o rotos	3	3	4	1	1	5	2	13	117	MEDIO
		Cableado defectuoso	5	4	5	1	1	5	3	15	300	ALTO
		Atasco en el mecanismo de selección	2	3	4	1	1	5	2	13	78	BAJO
		Resortes flojos o rotos	3	3	4	1	1	5	2	13	117	MEDIO
Atasco en el mecanismo de selección		2	3	4	1	1	5	2	13	78	BAJO	
Desgaste de los contactos eléctricos		5	5	4	1	1	5	2	13	325	ALTO	



Circuitos referentes al motor	Statodyne	Bandas flojas	4	3	3	1	1	5	2	12	144	MEDIO
		Bloque rectificador defectuoso	2	3	3	1	1	5	2	12	72	BAJO
		Batería en mal estado	2	3	2	1	1	5	2	11	66	BAJO
		Cableado y protecciones defectuoso	5	4	4	1	1	5	3	14	280	ALTO
		Bandas flojas	4	3	3	1	1	5	1	11	132	MEDIO
		Cableado protecciones y contactores defectuosos	5	4	4	1	1	5	3	14	280	ALTO
		Falta de aislamiento en los embobinados inducidos	2	2	3	1	1	4	2	11	44	BAJO
		Bloque rectificador defectuoso	2	2	3	1	1	4	2	11	44	BAJO
		Falta de lubricación en cojinetes	3	2	2	1	1	5	2	11	66	BAJO
	Arranque	Desgaste en los contactores que comandan el motor	5	5	4	1	1	5	2	13	325	ALTO
		Desconexion del cableado de los motores de tracción	5	5	3	1	1	5	1	11	275	ALTO
		Falla en Escobillas y portaescobillas	3	3	2	1	1	5	2	11	99	MEDIO
		Contactores se quedan pegados	5	5	4	1	1	5	2	13	325	ALTO
		Falta de lubricación en la caperuza de eje-cojinetes	3	3	2	1	1	5	2	11	99	MEDIO

		Falta de lubricación del piñón y engranajes de la transmisión	3	3	2	1	1	5	2	11	99	MEDIO
		Baja intensidad proveniente de las baterías	5	5	3	1	1	4	2	11	275	ALTO
		Deficiencia en las conexiones de los motores de arranque	5	5	4	1	1	5	1	12	300	ALTO
	Control electromagnético de Ventilador.	Cableado del circuito de control deficiente	5	5	3	1	1	4	3	12	300	ALTO
		Contactores desgastados o flojos	5	5	3	1	1	4	3	12	300	ALTO
		Relés de control defectuosos	5	5	3	1	1	4	3	12	300	ALTO
	Módulo sensor de velocidad	Deficiencia en el cableado y protecciones de la tarjeta de control	5	4	4	2	1	5	2	14	280	ALTO
		Falta de alimentación a la tarjeta de control por relés	5	4	4	2	1	5	2	14	280	ALTO
		Falla del sensor de velocidad del motor diésel	2	2	4	2	1	5	2	14	56	BAJO
		Falla de la Unidad de control	2	2	4	2	1	5	2	14	56	BAJO
Circuitos de iluminación y cabina	Luces interiores	Circuito de control defectuoso	3	3	3	1	1	3	1	9	81	BAJO
		Bombillo quemado	3	3	3	1	1	3	1	9	81	BAJO

	Luces exteriores	Circuito de control defectuoso	4	3	3	1	1	3	1	9	108	MEDIO
		Bombillo quemado	3	3	3	1	1	3	1	9	81	BAJO
	Bocinas	Circuito de control defectuoso	4	3	3	1	1	3	1	9	108	MEDIO
		Bombillo quemado	2	2	3	1	1	3	1	9	36	BAJO
	Pictogramas	Circuito de control del pictograma defectuoso	3	3	4	1	1	3	2	11	99	MEDIO
	Circuito de Frenado	Frenado reostático	Contactores desgastados o flojos	5	5	5	1	1	5	1	13	325
Relés de control defectuosos			5	5	5	1	1	5	1	13	325	ALTO
Cableado defectuoso			5	4	5	1	1	5	2	14	280	ALTO
Control de Freno neumático		Relés defectuosos	5	4	5	1	1	5	2	14	280	ALTO
		Cableado defectuoso	5	4	5	1	1	5	2	14	280	ALTO
		Escape de aire con la electroválvula bajo tensión o sin tensión	5	4	5	1	1	5	2	14	280	ALTO
		Baja resistencia de la bobina de la electroválvula comandadora	2	3	5	1	1	5	2	14	84	BAJO

Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

**Tabla 5-5:** Criticidad de fallas del sistema neumático.

EQUIPO/ SUBSISTEMA	COMPONENTE	MODO DE FALLA	OCURRENCIA	DETECTABILIDAD	FRECUENCIA					TOTAL	RPN	CATEGORIZACIÓN
					SSO	AMB	REP	PROD	MTTR			
Compresor	Bandas de transmisión	Bandas flojas	5	3	4	2	1	5	2	14	210	MEDIO
		Bandas desgastadas	3	3	4	2	1	5	2	14	126	MEDIO
	Filtro	Filtro tapado	3	3	3	2	1	5	1	12	108	MEDIO
	Válvulas	Mal asentamiento de válvulas	5	4	3	2	1	5	3	14	280	ALTO
	Empaque	Empaque desgastado	2	3	3	2	1	5	3	14	84	BAJO
	Rines	Rines desgastados	3	2	3	2	1	4	3	13	78	BAJO
Válvulas de control y cañerías	Válvulas de control	Válvula no se cierra	5	4	4	2	1	5	3	15	300	ALTO
		Válvula no se abre	5	4	4	2	1	5	3	15	300	ALTO
	Cañerías de circuitos neumáticos.	Fugas en las cañerías de los circuitos neumáticos	5	4	4	2	1	5	2	14	280	ALTO

Equipo de frenado	Freno continuo automático	Válvulas de accionamiento defectuosas	5	4	5	1	1	5	2	14	280	ALTO
		Cañerías de freno con fugas	4	5	5	1	1	5	2	14	280	ALTO
		Depósito de equilibrio con fugas	3	3	5	1	1	5	2	14	126	MEDIO
	Freno neumático directo	Válvulas de accionamiento defectuosas	4	3	5	1	1	5	2	14	168	MEDIO
		Cañerías de freno con fugas	3	3	5	1	1	5	2	14	126	MEDIO
	Freno de estacionamiento	Cilindros neumáticos de freno defectuoso	4	5	5	1	1	5	3	15	300	ALTO
		Cuña desgastada del cilindro de freno	5	4	4	1	1	5	3	14	280	ALTO
		Circuito de frenado con fuga	3	3	5	1	1	5	2	14	126	MEDIO

Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

Los criterios utilizados para el análisis de criticidad de fallas, se encuentran en el Anexo B. La matriz de criticidad y categorización RPN, usadas para este análisis se muestra en el Anexo C. Una vez definidos los criterios y la matriz de criticidad, se realiza el análisis a cada uno de los modos de falla, el objetivo es determinar las fallas con criticidad alta, media y baja.

### **Análisis de los resultados**

El análisis de modos de falla y criticidad (FCMECA), realizado a los modos de falla de la locomotora, muestra que existen 24 modos de falla con una criticidad alta y 16 con criticidad media en el sistema eléctrico, los cuales representan el mayor riesgo al conjunto total de sistemas de la locomotora.

En cuanto al equipo neumático, existe 8 modos de falla con criticidad alta, y 7 con criticidad media. Esto se debe a que la ocurrencia de estos modos de falla es menor al mostrado por el equipo eléctrico, no obstante, es indispensable el reducir también estos modos de falla ya que se ha propuesto disminuir las fallas de estos dos sistemas.

### **Mejoras sugeridas para los planes de mantenimiento**

Actualmente, para el mantenimiento de las locomotoras, se vienen ejecutando planes de mantenimiento de acuerdo a la siguiente designación:

- Semanalmente, o 25 h
- Mantenimiento R1, mensualmente o 100 h
- Mantenimiento R2, Bimensual o 200 h
- Mantenimiento R3, Semestral o 500 h
- Mantenimiento R4, Anual o 1000 h

Estas actividades, son consideradas como obligatorias, adicionalmente existen planes de mantenimiento por horas o meses, diseñados para los 4 sistemas de las locomotoras. De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis CMD el indicador MTBMP de 28,18 h, correspondería a la ejecución de estas actividades.

El resultado indica que las actividades planificadas se están cumpliendo sin embargo el indicador MTBMc de 57,63 h, manifiesta que las acciones ejecutadas no son suficientes o su ejecución es muy tardía, esto se puede asegurar ya que al analizar los planes de mantenimiento actuales se observó que muchas de las acciones preventivas relacionadas

a los modos de falla analizados, se planifican a las 250 h de funcionamiento o a los tres meses.

Atendiendo a lo anterior se considera necesario la modificación de frecuencias y la implementación de algunas tareas de mantenimiento, a fin de controlar las fallas y así aumentar la confiabilidad correctiva. La propuesta de mejora a los planes de mantenimiento se muestra en la Tabla 6-5.

Debido a que las fallas ocurren a las 57,63 h y el intervalo de frecuencias de mantenimiento es de 25 h, se puede establecer el criterio de que las fallas críticas se controlen a las 25 h y las medias a las 50 h.

La mejora y optimización de los planes de mantenimiento a través de las tareas de mantenimiento derivadas del análisis de Pareto y FCMECA, permitirán en el futuro incrementar los índices de confiabilidad a través de la mejora del indicador MTBMc y también de la mantenibilidad a través de la disminución de eventos de reparación que dan lugar a bajos indicadores de MTTR.

#### *5.7.6.2 Mejoras en la mantenibilidad*

Las mejoras en la mantenibilidad se consiguen al optimizar los tiempos de realización de mantenimiento por lo que en la propuesta planteada esto se logrará gracias a los procedimientos sugeridos en las áreas de mantenimiento programado, mantenimiento correctivo y mantenimiento preventivo gracias a la estandarización de estos protocolos en todos los talleres, dado que actualmente no existen este tipo de protocolos.

La propuesta está diseñada para que los indicadores CMD, sean evaluados con una frecuencia mensual y determinar si se requiere formular estrategias para seguir mejorando los procesos de mantenimiento que se van a seguir.

Se debe mencionar además que gracias a las estrategias de mejora de la confiabilidad debida a mantenimientos correctivos que se consigue a través del control que se le dé al apareamiento de fallas, provocará también que no ocurran eventos TTR, lo cual influye directamente en la mejora del indicador MTTR y  $\overline{M}$ .

**Tabla 6-5:** Acciones de mantenimiento sugeridas para los planes de mantenimiento preventivo del sistema eléctrico.

EQUIPO/SUBSISTEMA	COMPONENTE	MODO DE FALLA	ACCIONES SUGERIDAS	FRECUENCIA RECOMENDADA	CATEGORIZACIÓN
Circuito de Potencia	Alternador principal	Falla del cojinete de rodillos cilíndricos	Revisión del cojinete de rodillos cilíndricos.	25 h	ALTO
		Porta escobillas desconectados	Revisión de la conexión de los porta escobillas.	25 h	ALTO
	Motores de tracción	Falla en Escobillas y porta escobillas	Verificación del estado de las escobillas y porta escobillas.	50 h	MEDIO
		Falta de lubricación en la caperuza de eje-cojinetes	Inspección de fugas de lubricante en la caperuza de eje-cojinetes.	50 h	MEDIO
			Lubricación en la caperuza de eje-cojinetes.	6 meses	
		Falta de lubricación del piñón y engranajes de la transmisión	Inspección de fugas de lubricante del piñón y engranajes de la transmisión.	50 h	MEDIO
			Lubricación del piñón y engranajes de la transmisión.	6 meses	
		Deficiencia en las conexiones de los motores de tracción	Revisión de las conexiones de los motores de tracción.	25 h	ALTO
	Inversores J20, J21	Mal funcionamiento en los relés inversores	Comprobación del funcionamiento de los relés inversores.	50 h	MEDIO
		Deficiencia en las conexiones del circuito inversor	Revisión y limpieza de las conexiones del circuito inversor.	50 h	MEDIO
	Contactores ATP	Falla de la bobina de mando de contactor	Comprobación de la bobina de mando de contactor.	50 h	MEDIO
	Manipulador	Desgaste de los contactos eléctricos	Revisión de los contactos eléctricos del manipulador.	25 h	ALTO



		Resortes flojos o rotos	Revisión del estado de los resortes.	50 h	MEDIO
		Cableado defectuoso	Revisión y limpieza de las conexiones del cableado del manipulador.	25 h	ALTO
Circuitos referentes al motor	Statodyne	Bandas flojas	Revisión del ajuste de las bandas de transmisión.	50 h	MEDIO
		Cableado y protecciones defectuoso	Revisión del cableado y comprobación del estado los elementos de protección del circuito.	25 h	ALTO
	Arranque	Desgaste en los contactores que comandan el motor	Revisión del desgaste de los contactores que comandan el motor.	25 h	ALTO
		Desconexión del cableado de los motores de tracción	Verificación de la conexión del cableado con los motores de tracción	25 h	ALTO
		Falla en Escobillas y porta escobillas	Comprobación del funcionamiento de escobillas y porta escobillas	50 h	MEDIO
		Contactores se quedan pegados	Comprobación del funcionamiento de los contactores	25 h	ALTO
		Falta de lubricación en la caperuza de eje-cojinetes	Revisión de fugas de lubricante en la caperuza de eje-cojinetes	50 h	MEDIO
			Lubricación de la caperuza de eje-cojinetes	6 meses	
		Falta de lubricación del piñón y engranajes de la transmisión	Revisión de fugas de lubricante del piñón y engranajes de la transmisión del motor.	50 h	MEDIO
			Lubricación del piñón y engranajes de la transmisión del motor.	6 meses	
		Baja intensidad proveniente de las baterías	Verificación del amperaje y voltaje de las baterías.	25 h	ALTO
		Deficiencia en las conexiones de los motores de arranque	Revisión del estado de las conexiones de los motores de arranque.	25 h	ALTO
	Control electromagnético de Ventilador.	Cableado del circuito de control deficiente	Comprobación del cableado del circuito de control del acoplador electromagnético.	25 h	ALTO

		Contadores desgastados o flojos	Revisión del estado de los contactores	25 h	ALTO
		Relés de control defectuosos	Comprobación del funcionamiento de relés.	25 h	ALTO
	Módulo de control de velocidad	Deficiencia en el cableado de la tarjeta de control	Revisión del cableado de conexión de la tarjeta de control.	25 h	ALTO
		Falta de alimentación a la tarjeta de control por relés	Comprobación del funcionamiento de los relés de alimentación.	25 h	ALTO
Circuitos de iluminación y cabina	Luces exteriores	Circuito de control defectuoso	Comprobación del estado del cableado del circuito de control de las luces exteriores	50 h	MEDIO
	Bocinas	Circuito de control defectuoso	Comprobación del estado del cableado del circuito de control de las bocinas	50 h	MEDIO
	Pictogramas	Circuito de control del pictograma defectuoso	Comprobación del estado del cableado del circuito de control de pictogramas.	50 h	MEDIO
Circuito de Frenado	Frenado reostático	Contadores desgastados o flojos	Revisión del estado de los contactores.	25 h	ALTO
		Relés de control defectuosos	Comprobación del funcionamiento de los relés de control del frenado reostático.	25 h	ALTO
		Cableado defectuoso	Revisión del cableado de control del frenado reostático.	25 h	ALTO
	Control de Freno neumático	Relés defectuosos	Comprobación del funcionamiento de los relés de control de freno neumático.	25 h	ALTO
		Cableado defectuoso	Revisión del cableado de control del frenado neumático.	25 h	ALTO
		Escape de aire con la electroválvula bajo tensión o sin tensión	Verificación del funcionamiento de electroválvulas.	25 h	ALTO

**Realizado por:** Ing. Luis F. Buenaño M.

**Tabla 7-5:** Acciones de mantenimiento sugeridas para los planes de mantenimiento del sistema neumático.

EQUIPO/SUBSISTEMA	COMPONENTE	MODO DE FALLA	ACCIONES SUGERIDAS	FRECUENCIA RECOMENDADA (H)	CATEGORIZACIÓN
Compresor	Bandas de transmisión	Bandas flojas	Revisión del ajuste de las bandas.	50 h	MEDIO
		Bandas desgastadas	Comprobación del estado de las bandas.	50 h	MEDIO
	Filtro	Filtro tapado	Revisión y limpieza del filtro de aire.	50 h	MEDIO
	Válvulas	Mal asentamiento de válvulas	Comprobación del asentamiento de las válvulas.	25 h	ALTO
Válvulas de control y cañerías	Válvulas de control	Válvula no se cierra	Comprobación del funcionamiento de las válvulas.	25 h	ALTO
		Válvula no se abre			
	Cañerías de circuitos neumáticos.	Fugas en las cañerías de los circuitos neumáticos.	Comprobación de las cañerías de los sistemas neumáticos.	25 h	ALTO
Equipo de frenado	Freno continuo automático	Válvulas de accionamiento defectuosas	Comprobación del funcionamiento de las válvulas de accionamiento de freno automático.	25 h	ALTO
		Cañerías de freno con fugas	Comprobación de las cañerías de freno por fugas.	25 h	ALTO
		Depósito de equilibrio con fugas	Verificación del depósito de equilibrio con fugas.	50 h	MEDIO
	Freno neumático directo	Válvulas de accionamiento defectuosas	Comprobación del funcionamiento de las válvulas de accionamiento.	50 h	MEDIO
		Cañerías de freno con fugas	Verificación del estado de las cañerías de freno neumático directo por fugas.	50 h	MEDIO
	Freno de estacionamiento	Cilindros neumáticos de freno defectuosos.	Verificación del funcionamiento de los cilindros neumáticos de frenado.	25 h	ALTO
		Cuña desgastada del cilindro de freno	Revisión del estado de la cuña del cilindro de freno.	25 h	ALTO
		Circuito de frenado con fuga	Verificación del estado de las cañerías de freno de estacionamiento por fugas.	50 h	MEDIO

Realizado por: Ing. Luis F. Buenaño M.

### **5.7.7 Control y supervisión de las acciones de mantenimiento**

Para el correcto desenvolvimiento y el control y supervisión de las acciones de mantenimiento que se lleven a cabo de acuerdo a los procedimientos propuestos, es necesario generar la documentación pertinente para que la información pueda ser manejada en todas las funciones de la gestión de mantenimiento.

Estos documentos deben ser utilizados de acuerdo a los protocolos propuestos para la gestión del mantenimiento por el personal designado, además la información que se genere debe tener el respectivo respaldo digital en la nube, estando además a disposición de todos los involucrados a través de la nube de información.

Los documentos que se manejarán, son los siguientes:

- Reportes de Falla
- Reportes técnicos de falla
- Reporte de reparación
- Solicitud de repuestos
- Documentos de registro de mantenimiento
- Registros de horómetros
- Orden de trabajo/Reparación
- Reportes de Mantenimiento

El formato de los documentos, se presentan en el Anexo D

## **5.8 Evaluación**

La evaluación del plan de Gestión de Mantenimiento planteado, luego de su implementación, se lo realizará a través de un sistema de indicadores CMD.

### **5.8.1 Sistema de indicadores CMD**

Uno de los pilares en los que se fundamenta esta propuesta es la medición de los indicadores CMD, para lo cual es necesario que se esté midiendo constantemente su evolución ya que estos son indicadores directos del sistema de Gestión de Mantenimiento que se está aplicando.

**Tabla 8-5:** Cuadro de indicadores propuestos para el plan de Gestión de Mantenimiento.

INDICADOR		DESCRIPCIÓN	FÓRMULA	UNIDAD	RESPONSABLE DE SEGUIMIENTO	FRECUENCIA
CONFIABILIDAD	<b>MTBMc</b>	Es el tiempo medio entre mantenimientos no planeados o correctivos, se aproxima a MTBF en ausencia de mantenimientos no planeados.	$\frac{\sum TBFs}{N^{\circ} \text{Eventos \u00fasiles}}$ , <i>Media de la distribuci\u00f3n ajustada</i>	h	Unidad de Movilidad y Mec\u00e1nica	Mensual
	<b>MTBMp</b>	Es el tiempo medio entre mantenimientos planeados o preventivos.	$\frac{\sum TBMc}{N^{\circ} \text{Eventos \u00fasiles}}$ , <i>Media de la distribuci\u00f3n ajustada</i>	h	Unidad de Movilidad y Mec\u00e1nica	Mensual
	<b>MTBM</b>	Tiempo medio entre mantenimientos, indica la frecuencia de los mantenimientos, es funci\u00f3n de los mantenimientos planeados y no planeados.	$MTBM = \frac{1}{\frac{1}{MTBMc} + \frac{1}{MTBMp}}$	h	Unidad de Movilidad y Mec\u00e1nica	Mensual
MANTENIBILIDAD	<b>MTTR</b>	Tiempo neto medio para realizar reparaciones o mantenimientos correctivos.	$\frac{\sum TTR}{N^{\circ} \text{Eventos \u00fasiles}}$ , <i>Media de la distribuci\u00f3n ajustada</i>	h	Unidad de Movilidad y Mec\u00e1nica	Mensual
	<b>Mp</b>	Tiempo medio neto para ejecutar tareas de mantenimientos planeados.	$\frac{\sum Mps}{N^{\circ} \text{M.Planeados}}$ , <i>Media de la distribuci\u00f3n ajustada</i>	h	Unidad de Movilidad y Mec\u00e1nica	Mensual
	$\bar{M}$	Tiempo medio de mantenimiento activo que se requiere para realizar una tarea de mantenimiento.	$\bar{M} = \frac{MTTR + \frac{Mp}{MTBMc}}{\frac{1}{MTBMc} + \frac{1}{MTBMp}}$	h	Unidad de Movilidad y Mec\u00e1nica	Mensual
DISPONIBILIDAD	<b>DA</b>	Disponibilidad alcanzada es la proporci\u00f3n de tiempo durante el cual un sistema o equipo estuvo en condiciones de ser usado, es ideal cuando se busca controlar las tareas planeadas y correctivas por separado.	$D_A = \frac{MTBM}{MTBM + \bar{M}}$	%	Unidad de Movilidad y Mec\u00e1nica	Mensual

Realizado por: Ing. Luis F. Buena\u00f1o M

Los indicadores que se deben medir, están en función de la disponibilidad alcanzada, para lo cual se los describe en la Tabla 8-5. Para la medición de estos indicadores, es recomendable que, para obtener resultados exactos se utilice el método con distribuciones propuesto en la presente investigación (véase la Figura 1-3), con la ventaja de que se puede obtener gráficas de probabilidad de confiabilidad y mantenibilidad.

No obstante, queda a criterio de la empresa el usar el método puntual para el cálculo, dado que este se basa en los promedios de los parámetros con los que se cuenta y tiene la característica de que su utilización es muy simple y adecuada empresas en que se está comenzando con este tipo de mediciones.

Es importante también el mencionar que para facilitar este tipo de mediciones y asegurar la confiabilidad de los resultados, la información que se maneje debe ser verídica por lo que es importante tener en cuenta que el llenado de los documentos relacionados al registro de horómetros y tiempos de mantenimiento deben ser información exacta.

Los indicadores deben ser medidos, esencialmente para medir la evolución de los logros alcanzados con respecto a los objetivos de mantenimiento, que en este caso son mejorar los niveles de disponibilidad alcanzada, confiabilidad y mantenibilidad.

Su estudio es la base del procedimiento diseñado para el área IV de mantenimiento preventivo ya que su análisis podrá determinar la eficiencia del modelo de gestión de mantenimiento y de los planes de mantenimiento que se estén aplicando.

Los valores referenciales para la comparación al inicio de implementación del modelo serán los resultados obtenidos en la presente investigación, por lo que es de vital importancia el considerar los resultados aquí planteados.

## **5.9 Impacto**

El impacto que tendrá la propuesta de acuerdo a la experiencia conseguida durante la elaboración de la investigación, genera aspectos positivos y negativos.

### **5.9.1 Aspectos positivos**

Entre los aspectos positivos, se tiene los siguientes:

- Aceptación por parte de la gerencia general al buscar estrategias que permitan mejorar la gestión de mantenimiento aplicada a las locomotoras diésel eléctricas de FEEP.
- Motivación del personal de mantenimiento en el sentido de mejorar los procedimientos relacionados a la realización del mantenimiento y al manejo de indicadores CMD.
- El adoptar un plan de mantenimiento basados en una investigación mediante indicadores CMD, para mejorar la disponibilidad de locomotoras y por ende la mejora de los servicios que presta FEEP al evitar fallos.
- Utilizar un plan de gestión de mantenimiento tendiente a la mejora continua de los procesos, gracias a los procedimientos de análisis de indicadores CMD y la formulación de estrategias de mejora.

### **5.9.2 Aspectos negativos**

- Se requerirá el cambio de los formatos y el aprendizaje para manejarlos por parte del personal de mantenimiento
- El ingreso de datos de forma errónea en los reportes de mantenimiento puede alterar los resultados obtenidos en futuras mediciones, por lo que es necesario el control por parte del jefe de taller la coherencia de los datos ingresados para corregir los errores a tiempo.

## CONCLUSIONES

- La utilización de indicadores de mantenimiento CMD mediante el cálculo de la disponibilidad alcanzada en la flota de locomotoras de FEEP, es posible debido a que existe la información necesaria en los registros de mantenimiento, dando como resultado la medida de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad alcanzada en la flota de locomotoras diésel eléctricas de FEEP y que reflejan los logros alcanzados por la actual gestión de mantenimiento.
- La metodología propuesta para la medición de indicadores CMD en las locomotoras de FEEP, 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 FEEP, 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.
- El análisis de Pareto de las fallas ocurridas en las locomotoras de FEEP, durante el período investigado, determinó que los sistemas eléctrico y neumático de las locomotoras, son responsables del 80% de las fallas que han sido objeto de mantenimiento correctivo.
- Mediante el análisis de Modos de Fallas, Efectos y Criticidad (FMECA) en las locomotoras presentadas durante el período investigado, se determinó que el sistema eléctrico presenta 24 modos de falla con una criticidad alta, 16 con criticidad media y los cuales representan el mayor riesgo al conjunto total de



sistemas de la locomotora. En cuanto al equipo neumático, existe 8 modos de falla con criticidad alta, y 7 con criticidad media.

Los componentes que presentan modos de falla con una criticidad alta en el equipo eléctrico son: alternador principal, motores de tracción, manipulador, statodyne, arranque, módulo de control de velocidad, control electromagnético de ventilador, módulo sensor de velocidad, frenado reostático y control de freno neumático.

En el equipo neumático se tiene: válvulas de compresor, válvulas de control, cañerías de circuitos neumáticos, freno continuo automático, freno de estacionamiento.

- La metodología planteada para la medición de los indicadores en el estudio, es aplicable para la evaluación mensual de la aplicación de la propuesta a través de la correcta utilización de los formatos propuestos para el manejo de la información.
- La propuesta titulada “Plan de Gestión de Mantenimiento basado en el análisis de índices de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad de las locomotoras tipo BBB 2400 de FEED”, la cual incluye mejoras sustanciales a la gestión en las áreas de Planificación, Programación, Mantenimiento Programado, Mantenimiento Correctivo, Mantenimiento preventivo, y junto con la modificación de las tareas y frecuencia de mantenimiento, permitirán eventualmente en el futuro la mejora de la Gestión de Mantenimiento con el consecuente incremento de los índices de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad.

## RECOMENDACIONES

- Realizar una capacitación al personal de mantenimiento, en las que se socialice los procedimientos de ejecución de las funciones de mantenimiento y el uso de los formatos de información, antes de realizar la implantación de la propuesta del Plan de Gestión de Mantenimiento.
- El personal de mantenimiento deberá registrar correctamente la información en los formatos preestablecidos, poniendo especial atención al registro de horómetros, modos de falla y tiempos de reparación y mantenimiento, a fin de que el análisis posterior de los indicadores CMD sea efectivo.
- Se debe procurar la mejora continua de los procedimientos de mantenimiento y los planes de mantenimiento a través de los protocolos presentados en el área de mantenimiento preventivo, a fin de ir corrigiendo y mejorando aspectos contenidos en esta propuesta.
- Para que la implantación del Plan de Gestión de Mantenimiento tenga éxito, debe existir el compromiso de todos los departamentos y de la gerencia de cada filial, a fin de facilitar la instauración de la propuesta.
- El flujo de la información y la comunicación entre el personal de la función de mantenimiento establecido en el presente plan, debe realizarse de acuerdo a los protocolos sugeridos, a fin de que la interacción entre las áreas sea eficiente y las actividades de mantenimiento sean ejecutadas rápida y apropiadamente.
- Los tiempos logísticos tienden a incrementar los tiempos de reparación y mantenimiento, por lo que es indispensable que se mantenga un stock adecuado de los materiales y repuestos de mantenimiento, considerando además demoras debidas a tiempos de entrega y posibles retrasos al momento del abastecimiento.

## BIBLIOGRAFÍA

**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.

**Aguilar Otero, J. R., Torres Arcique, R., & Magaña Jiménez, D. (2010).** *Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad*. Obtenido de: [http://web.imiq.org/attachments/345\\_15-26.pdf](http://web.imiq.org/attachments/345_15-26.pdf)

**Calderón Quesada, N. C. (2014).** *Mejora del Tiempo de Operatividad de Camiones Volquetes en Proyectos de Mantenimiento Vial utilizando Teoría de Confiabilidad en un Sistema Simulado*. (tesis) Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. Obtenido de: [http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/cybertesis/4241/1/Calderon\\_qn.pdf](http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/cybertesis/4241/1/Calderon_qn.pdf)

**Ecured. (Septiembre de 2015).** *Locomotora diésel eléctrica*. Obtenido de: [http://www.ecured.cu/Locomotora\\_di%C3%A9sel\\_el%C3%A9ctrica](http://www.ecured.cu/Locomotora_di%C3%A9sel_el%C3%A9ctrica)

**FEEP. (2015).** *Historia del Ferrocarril*. Obtenido de: <http://trenecuador.com/ferrocarrilesdelecuador/historia/>

**FEEP. (2014).** *Estatuto Orgánico de Gestión por Procesos*. Recuperado el 15 de enero 2016, de: <http://goo.gl/ic42HU>

**GEC ALSTHOM. (1992).** *Folleto de estudio, Manual de conducción, Guía de reparación de la Locomotora tipo BBB 2400*.

**Hernández Domínguez, A. M. (2010).** *Análisis estadístico de datos de tiempos de fallo en R*. Granada, España. Obtenido de: <http://masteres.ugr.es/moea/pages/tfm0910/analisisestadisticodedatosdetiemposdefalloor/>

**Juan, Á. A., & García Martín, R. (2002).** *Conceptos básicos de Fiabilidad*. Obtenido de: [http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Fiab\\_1.pdf](http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Fiab_1.pdf)

**López, E. R.** (4 de Septiembre de 2012). *Estudio de mejora del mantenimiento mediante la aplicación de la distribución de Weibull a un histórico de fallos*. Obtenido de: <http://es.slideshare.net/EduardoRL2/pfpg>

**Márquez, M.** (Diciembre de 2010). *Manual de la Ingeniería de la Calidad. Módulo III Gestión de Mantenimiento*. Caracas, Venezuela. Obtenido de: <https://www.scribd.com/doc/47407209/III-C8-Gestion-Mantenimiento>

**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/>

**Mora Gutiérrez, L. A.** (2009). *Mantenimiento. Planeación, ejecución y control*. Colombia: Alfaomega.

**Palacio, L. H.** (2015). *Cálculo de los parámetros de la distribución de Weibull*. *Mantenimiento en Latinoamérica*, 15-22. Obtenido de: <http://mantenimientoenlatinoamerica.com/pdf/ML%20Volumen%207-2.pdf>

**Placencia Urrutia, S.** (2014). *Terminología del Mantenimiento*.

**Rodríguez del Águila, M. Á.** (2012). *Propuesta de mejora de la gestión de mantenimiento basado en la mantenibilidad de equipos de acarreo de una empresa minera de Cajamarca*. (tesis). Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú. Obtenido de:

<http://repositorio.upn.edu.pe/xmlui/bitstream/handle/11537/89/Rodriguez%20del%20Aguila%20Miguel%20Angel.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

**Sánchez, A., Clemente, G., Sanz, J., & Martorell, S.** (8-11 de Abril de 2003). *Evaluación de la confiabilidad de equipos mediante el seguimiento de indicadores*. *Aplicación a la Industria Ferroviaria*. Lleida. Obtenido de: [http://web.udl.es/usuaris/esi2009/treballs/11\\_1\\_3.pdf](http://web.udl.es/usuaris/esi2009/treballs/11_1_3.pdf)

**Sexto, L. F.** (23 de Febrero de 2005). *Mantenimiento Mundial*. Obtenido de: <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/notas/CONFIABILIDAD-MM.pdf>

**STATGRAPHICS.** (14 de 9 de 2006). *Ajustando Distribución (Datos Censurados)*.

**Torres, L. D.** (2010). *Mantenimiento. Su implementación y gestión* (Tercera ed.). Argentina: Universitas.

**UNEFA.** (Mayo de 2011). *Estructura de la Unidad de mantenimiento y Gestión de Mantenimiento*. Caracas, Venezuela. Obtenido de:

<https://www.scribd.com/doc/98748395/ESTRUCTURA-DE-LA-UNIDAD-DE-MANTENIMIENTO-Y-GESTION-DE-MANTENIMIENTO>

**Vergara Rea, E.** (Marzo de 2007). *Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad del Sistema de crudo Diluido de Petrozuata*. (tesis). Universidad Simón Bolívar. Obtenido de:

[http://www.postgrado.usb.ve/archivos/95/Trabajo\\_Final\\_An%C3%A0lisis\\_RAM\\_Edgar\\_Vergara\\_Marzo2007.pdf](http://www.postgrado.usb.ve/archivos/95/Trabajo_Final_An%C3%A0lisis_RAM_Edgar_Vergara_Marzo2007.pdf)

**Visita Ecuador.** (2015). *Ferrocarril del Ecuador*. Obtenido de: <https://www.visitaecuador.com/ve/mostrarRegistro.php?idRegistro=25244>

## **ANEXOS**

### **ANEXO A: Preguntas de la encuesta**

#### **Instrucciones:**

**Bajo las preguntas de la encuesta existe una escala puntuada del 0 al 5**

**0 No existe o ninguno**

**1 Malo**

**2 Deficiente**

**3 Regular**

**4 Bueno**

**5 Excelente**

**Por favor usted deberá seleccionar el puntaje que usted evalúe para el ítem.**

**En el caso de que la pregunta corresponda a un aspecto en el que la organización de mantenimiento del taller no haya trabajado o no exista, por favor seleccione 0 (0 No existe o ninguno).**

#### **Área I. Organización del Mantenimiento para las locomotoras de FEED**

##### **Funciones y responsabilidades de la función de mantenimiento**

1. ¿En qué medida la función de mantenimiento para las locomotoras, está bien definida y ubicada dentro de la filial de FEED en la cual desempeña sus actividades?
2. Los organigramas en los que se basa la función de mantenimiento de su dependencia, ¿en qué medida considera usted son los adecuados para la realización del mantenimiento de las locomotoras?
3. Califique lo siguiente: La función de mantenimiento tiene por escrito las diferentes funciones y responsabilidades para los diferentes miembros de la organización de mantenimiento.
4. La organización de mantenimiento, ¿en qué medida está acorde con el tamaño de la flota de locomotoras asignadas a su dependencia, el tipo de personal y la distribución geográfica en la que se desenvuelve las actividades de las locomotoras?

5. ¿Cómo califica lo siguiente? El personal con el que cuenta el taller, es suficiente tanto en cantidad como en calificación para cubrir las actividades de mantenimiento en las locomotoras.

#### **Autoridad y Autonomía de la organización de mantenimiento en el taller**

6. ¿En qué medida la unidad de mantenimiento tiene claramente definidas las líneas de autoridad dentro el taller de mantenimiento?

7. Califique lo siguiente: ¿En qué grado el personal asignado a mantenimiento tiene pleno conocimiento de sus funciones?

8. ¿En qué medida los problemas de carácter rutinario pueden ser resueltos en el taller sin consulta previa a niveles superiores?

#### **Sistema de Información manejado en el taller**

9. Pondere lo siguiente: La organización de mantenimiento, ¿en qué grado posee un sistema que le permite manejar óptimamente toda la información referente a mantenimiento (registro de fallas, programación de mantenimiento, estadísticas, costos información sobre equipos, u otra)?

10. ¿En qué grado la organización de mantenimiento dispone de los medios para el procesamiento de la información de las diferentes secciones o unidades en base a los resultados que se desean obtener?

11. ¿Cuál es la medida en la que la organización de mantenimiento cuenta con mecanismos para evitar que se introduzca información errada o incompleta en el sistema de información?

12. ¿En qué grado la organización de mantenimiento cuenta con un archivo ordenado y jerarquizado técnicamente?

13. ¿En qué grado la organización de mantenimiento, utiliza procedimientos normalizados (formatos) para llevar a comunicar la información entre las diferentes secciones o unidades, así como almacenamiento (archivo) para su cabal recuperación?

14. ¿En qué grado la organización de mantenimiento dispone de los mecanismos para que la información recopilada y procesada llegue a las personas que deben manejarla?

## **Área II. Planificación de Mantenimiento**

### **Objetivos y metas**

15. Pondere lo siguiente: Dentro de la organización de mantenimiento la función de planificación, ¿en qué grado tiene establecidos los objetivos y metas en cuanto a las necesidades de los objetos de mantenimiento, y el tiempo de realización de acciones de mantenimiento para garantizar la disponibilidad de los sistemas de la locomotora?

16. ¿En qué dimensión la organización tiene establecido un orden de prioridades para la ejecución de las acciones de mantenimiento de aquellos sistemas de la locomotora que lo requieren?

17. ¿En qué medida las acciones de mantenimiento que se ejecutan se orientan hacia el logro de objetivos?

### **Políticas para la planificación**

18. Califique lo siguiente: La organización de mantenimiento, ¿en qué dimensión ha establecido una política general que involucre su campo de acción, su justificación, los medios y objetivos que persigue?

19. ¿En qué medida la gerencia de mantenimiento tiene una planificación para la ejecución del mantenimiento de la locomotora?

20. ¿En qué grado la organización de mantenimiento tiene establecido un orden de prioridades para la ejecución de las acciones de mantenimiento de aquellos sistemas de la locomotora que lo requieran?

### **Control de Evaluación**

21. ¿En qué grado existen procesos normalizados para recabar y comunicar información así como su almacenamiento para su posterior uso?

22. ¿En qué medida la empresa posee un inventario de manuales de mantenimiento y operación, así como catálogos de piezas y partes de cada locomotora a mantener?

23. ¿En qué medida el taller lleva registros de fallas y causas por escrito?

24. ¿En qué grado se llevan estadísticas de tiempos de parada y de tiempo de reparación de las locomotoras?



25. ¿En qué medida se tiene archivada y clasificada la información necesaria para la elaboración de los planes de mantenimiento de las locomotoras?

### **Área III. Mantenimiento Programado**

#### **Planificación del mantenimiento programado**

26. ¿En qué grado la organización de mantenimiento cuenta con planes de mantenimiento programado adecuados en los cuales se especifiquen las acciones con la frecuencia adecuada en horas, intervalos de tiempo o kilometraje a ser ejecutadas en las locomotoras asignadas a su filial?

27. ¿En qué grado la organización de mantenimiento cuenta con una infraestructura y procedimientos para que las acciones de mantenimiento programado de las locomotoras se lleven a cabo en una forma organizada?

28. ¿Con qué puntaje calificaría usted a los planes de mantenimiento programado que actualmente se utiliza para el mantenimiento de las locomotoras asignadas a su filial?

29. Califique lo siguiente: La eficiencia de la información con la que cuenta la empresa para la elaboración de instrucciones técnicas de mantenimiento programado, así como sus procedimientos de ejecución.

#### **Programación e Implantación del mantenimiento programado**

30. ¿En qué dimensión la empresa cuenta con un sistema donde se identifique el programa de mantenimiento programado a seguir en cada locomotora?

31. ¿En qué dimensión los programas de mantenimiento se ejecutan con la frecuencia estipulada, es decir se evita ejecutar las acciones de manera variable y ocasionalmente?

32. Califique lo siguiente: La empresa cuenta con estudios de las condiciones de funcionamiento y las necesidades de mantenimiento de las locomotoras.

#### **Control y Evaluación del mantenimiento programado**

33. ¿En qué dimensión la organización de mantenimiento en el taller dispone de mecanismos eficientes para llevar a cabo el control y la evaluación de las actividades de mantenimiento programado de las locomotoras?

34. ¿En qué grado los formatos de control que se manejan permiten verificar si se cumple el mantenimiento programado y a su vez emitir órdenes para arreglos o reparaciones a fallas detectadas?

35. ¿En qué grado los formatos que se manejan permiten recoger información en cuanto al consumo de insumos requeridos para ejecutar las tareas de mantenimiento?

36. ¿En qué dimensión la recopilación de información que se genera permite la evaluación del mantenimiento programado basándose en los recursos utilizados y su incidencia en el sistema, así como la comparación con los demás tipos de mantenimiento?

#### **Área IV. Mantenimiento Preventivo**

##### **Determinación de parámetros para el mantenimiento preventivo**

37. ¿En qué medida la organización tiene establecido por objeto lograr efectividad en el mantenimiento de las locomotoras asegurando la disponibilidad de la flota mediante el estudio de confiabilidad?

38. ¿En qué medida la organización cuenta con estudios que permitan determinar indicadores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad en la flota de locomotoras y que permitan el mejoramiento de los programas de mantenimiento programado?

39. ¿Cómo califica el siguiente aspecto en el taller? Se tiene estudios estadísticos para determinar la frecuencia de las revisiones y sustituciones de piezas claves.

40. ¿Cómo califica el siguiente aspecto en su taller? Se llevan registros con los datos necesarios para determinar eficazmente los tiempos de parada y los tiempos entre fallas.

41. ¿En qué dimensión el personal de la organización de mantenimiento está capacitado para realizar mediciones de tiempos de parada y tiempos entre fallas?

##### **Planificación del mantenimiento preventivo**

42. ¿En qué dimensión la organización dispone de un estudio previo que le permita conocer los sistemas de la locomotora que requieren mantenimiento preventivo?

43. ¿En qué medida la organización cuenta con la infraestructura adecuada para la ejecución de mantenimiento preventivo en las locomotoras?

## **Programación e Implantación del mantenimiento preventivo**

44. ¿En qué medida las actividades de mantenimiento preventivo se programan en forma racional, de manera que el sistema de mantenimiento posea la elasticidad necesaria para llevar a cabo las acciones en el momento conveniente, no intervenir con la realización de los recorridos de la flota y disponer del tiempo suficiente para la reprogramación?
45. ¿En qué grado las órdenes de trabajo se logran emitir con la suficiente antelación a fin de que los encargados de la ejecución de las acciones de mantenimiento puedan planificar sus actividades?

## **Control y Evaluación del mantenimiento preventivo**

46. ¿En qué medida en la organización existen los recursos necesarios para el control de la ejecución de las acciones de mantenimiento preventivo en las locomotoras?
47. ¿En qué medida existe en la organización un seguimiento desde la generación de las instrucciones técnicas de mantenimiento preventivo de las locomotoras hasta su ejecución?
48. ¿En qué dimensión la recopilación de información que se genera permite la evaluación del mantenimiento preventivo basándose en los recursos utilizados y su incidencia en el sistema, así como la comparación con los demás tipos de mantenimiento?

## **Área V. Mantenimiento por Avería (Correctivo, no planeado)**

### **Atención a las fallas**

49. ¿En qué medida la organización está en capacidad para tender de una forma rápida y efectiva cualquier falla que se presente en las locomotoras?
50. ¿En qué medida la organización cuenta con instructivos de registros de fallas que permitan el análisis de las averías sucedidas para cierto periodo?
51. Califique lo siguiente: La rapidez con la que se emiten órdenes de trabajo para atacar una falla.
52. Pondere lo siguiente: La influencia de los tiempos administrativos de espera por materiales o repuestos, y de localización de la falla, presentes en alto grado durante la atención de la falla.

## **Supervisión y Ejecución**

53. Califique lo siguiente: En la organización, los ajustes, arreglos de defectos y atención a reparaciones urgentes se hacen inmediatamente después de que ocurre una falla en la locomotora.

54. ¿En qué grado existe un seguimiento desde la generación de las acciones de mantenimiento por avería hasta su ejecución?

55. ¿En qué medida se puede controlar el retardo de la ejecución de las actividades de mantenimiento por avería que puedan ocasionar paradas prolongadas de las locomotoras?

56. ¿En qué grado la empresa cuenta con el personal de supervisión adecuado para inspeccionar los equipos inmediatamente después de la aparición de la falla?

57. Pondere lo siguiente: La organización lleva registros adecuados para analizar las fallas y determinar la corrección definitiva o la prevención de las mismas

58. Pondere lo siguiente: La organización lleva registros adecuados sobre el consumo, de materiales o repuestos utilizados en la atención de las averías.

59. Califique lo siguiente: La organización cuenta con las herramientas, equipos e instrumentos necesarios para la atención de las averías.

60. ¿En qué grado el personal está capacitado para atender cualquier tipo de falla en las locomotoras?

**ANEXO B:** Criterios para la evaluación de la criticidad de los modos de falla.

Ocurrencia	Detectabilidad		Efecto										
			Seguridad y Salud Ocupacional	Medio Ambiente	Costos de Mantenimiento	Impacto a la Producción	Tiempo medio de reparación						
Ocurre más de una vez al mes	5	Falla oculta; no se detectará o bien no existe un programa de verificación que permita detectarla.	5	La falla genera un riesgo incontrolable que puede tener efectos catastróficos	5	La falla genera un riesgo medio ambiental incontrolable que puede tener efectos catastróficos	5	Mayor a 50000 USD	5	100 % de impacto	5	mayor a 48 Horas	5
Ocurre una vez al mes	4	Usando un programa de verificación, es improbable que se detecte el problema	4	La falla genera un riesgo a la seguridad que no puede controlarse con los recursos actuales	4	La falla genera un riesgo de daños al medio ambiente que no puede controlarse con los recursos actuales	4	Entre 50000 USD y 25000 USD	4	75% de impacto	4	de 24 a 48 Horas	4
Ocurre una vez a los 3 meses	3	Se puede detectar la falla, mediante un programa de verificación	3	Se genera un riesgo de seguridad serio, pero este puede ser controlado	3	Se genera un riesgo medio ambiental serio, pero este puede ser controlado	3	Entre 25000 USD y 10000 USD	3	50% de impacto	3	de 8 a 24 Horas	3
Ocurre una vez a los 6 meses	2	Existe alta probabilidad de detección	2	La falla genera un riesgo menor, que puede ser controlado	2	La falla genera un riesgo medio ambiental menor que puede ser controlado	2	Entre 10000 USD y 1000 USD	2	25% de impacto	2	de 4 a 8 Horas	2
Ocurre una vez al año	1	El problema es evidente, se detectará con toda certeza	1	La falla no genera un riesgo perceptible a la seguridad de pasajeros y trabajadores	1	La falla no genera un riesgo perceptible al medio ambiente	1	Menor a 1000 USD	1	No afecta	1	menor a 4 Horas	1


**ANEXO C: Matriz de Criticidad**

		SSO	AMB	REP	PROD	CAL	MTTR					
Efecto	5	5	5	5	5	5	30	30	120	270	480	750
	4	4	4	4	4	4	24	24	96	216	384	600
	3	3	3	3	3	3	18	18	72	162	288	450
	2	2	2	2	2	2	12	12	48	108	192	300
	1	1	1	1	1	1	6	6	24	54	96	150
								1	4	9	16	25
							<b>Ocurrencia</b>	1	2	3	4	5
							<b>Detectabilidad</b>	1	2	3	4	5


RPN	Categorización
ALTO	mayor a 270
MEDIO	96 a 269
BAJO	6 a 95

**ANEXO D:** Formato de documentación para mantenimiento

**Formato de mantenimiento rutinario y reporte de fallas.**

	FERROCARRILES DEL ECUADOR EMPRESA PÚBLICA - FEOP		Página 1 de 1	
	REVISIÓN RUTINARIA LOCOMOTORAS GEC ALSTHOM		FECHA DE REVISIÓN:	TALLER:
REALIZADO POR:				
ODÓMETRO			INICIO OPERACIÓN:	
1) LOCOMOTORA #	2) HORÓMETRO		FIN OPERACIÓN:	
			Estado	
Sistema	3) PUNTOS A SER COMPROBADOS		En Orden	Con Falla
Eléctrico	Alumbrado General			
	Pupitre, alumbrado de aparatos en cabina 1 y 2			
	Carga de baterías en amperímetros de cabina			
	Armario eléctrico, control visual de los equipos y armarios eléctricos			
	Contactores			
Térmico	Freno Reostático			
	Motor Diésel arranque			
	Motor Diésel funcionamiento			
	Temperatura motor diésel			
Mecánico	Motor diésel control visual fugas			
	Funcionamiento general bogies (amortiguación, cilindros de freno,			
Neumático	Funcionamiento general sistema neumático			
	Tiempo de carga del compresor de 0 a 8,5 bar (5'50" + 1')			
Circuito de freno: estado y funcionamiento				
<b>4) Registro de avería de locomotora:</b>				
<b>5) Irregularidades comprobadas:</b>			<b>6) Necesario enviar la locomotora al taller?</b>	
			Si	No
<b>7) Visto Bueno Operador</b>			<b>8) Visto Bueno Taller</b>	
			<b>9) N° O.R. para corregir fallas</b>	

## Reporte Técnico de fallas

	<b>FERROCARRILES DEL ECUADOR EMPRESA PÚBLICA - FEEP</b>		<b>Página 1 de 1</b>
	<b>REPORTE TÉCNICO DE FALLAS</b>		<b>FECHA DE REVISIÓN:</b>
<b>REALIZADO POR:</b>		<b>TALLER:</b>	
<b>ODÓMETRO</b>		<b>2) HORÓMETRO</b>	
<b>1) LOCOMOTORA #</b>			

<b>3) TIPO DE FALLA DETECTADA:</b>	<b>ELÉCTRICA</b>	<b>TÉRMICA</b>	<b>NEUMÁTICA</b>	<b>MECÁNICA</b>


<b>Falla detectada por:</b>	
-----------------------------	--

<b>4) Descripción de la falla</b>	<b>5) Causa de la falla</b>	<b>6) Observaciones</b>

<b>7) Visto Bueno Operador</b>	<b>8) Visto Bueno Taller</b>	<b>9) N° O.R. para corregir fallas</b>



# Orden de Trabajo / Reparación

	<b>FERROCARRILES DEL ECUADOR EMPRESA PÚBLICA - FEEP</b> <b>ORDEN DE TRABAJO/REPARACIÓN</b>					Página 1 de 1				
						Versión 1				
TALLER:		LOCOMOTORA:		PROGRAMADO POR:		<b>N°ORDEN:</b>				
FECHA GENERACIÓN:		HORÓMETRO		ASIGNADO A:						
FECHA EJECUCIÓN:		KILOMETRAJE		TIEMPO TOTAL ESTIMADO:						
<b>MANTENIMIENTO LOCOMOTORAS</b>										
SISTEMA O COMPONENTE	TAREA	TIEMPO	TIPO MANTENIMIENTO	MATERIALES	CANTIDAD	UN	RESPONSABLE	EJ	TIEMPO EJ	OBSERVACIONES
HERRAMIENTAS A UTILIZAR:					INFORME DE ACTIVIDADES:					
CIERRE DE LA ORDEN										
FECHA DE CIERRE:										
SUPERVISA:										
Visto Bueno Jefe de Taller					Visto Bueno Encargado Especialidad					

# Solicitud de Repuestos



**FERROCARRILES DEL ECUADOR EMPRESA PÚBLICA - FEEP**  
**SOLICITUD DE REPUESTOS**

Página 1 de 1

Versión 1

TALLER:		LOCOMOTORA:		SOLICITADO POR:		N°ORDEN:	N° ORDEN QUE SE ATIENDE
FECHA SOLICITUD:		HORÓMETRO					
		KILOMETRAJE					

COD REP/MAT	REPUESTO/MATERIAL	CANT	UNIDAD

Visto Bueno Jefe de Taller



## Formato para el estudio de indicadores CMD

	<b>FERROCARRILES DEL ECUADOR EMPRESA PÚBLICA - FEEP</b> <b>SOLICITUD DE REPUESTOS</b>	Página 1 de 1 Versión 1										
UNIDAD REALIZADORA DEL ESTUDIO:					REALIZADO POR:							
FECHA DE REALIZACIÓN:												
Periodo	INDICADOR:...	Análisis Weibull		PRUEBAS ANÁLISIS WEIBULL				tribución asum	PRUEBAS DISTRIBUCIÓN ASUMIDA			
				ANDERSON DARLING		KOLMOGORNOV SMIRLOV			ANDERSON DARLING		KOLMOGORNOV SMIRLOV	
		Beta	Eta	Valor-P	Cumple	Valor-P	Cumple		Valor-P	Cumple	Valor-P	Cumple
		<b>FIRMA RESPONSABILIDAD REALIZADOR DEL ESTUDIO:</b>										

**ANEXO E:** Componentes varios de la locomotora



Cilindros de freno de la locomotora



Conexión y motores de tracción



Armario eléctrico de la locomotora



Compresor de la locomotora



Ventilador con acoplador electromagnético



Manipuladores y pictogramas



Alternador principal



Cableado y componentes eléctricos de control