

ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN EN LÍNEA DE  
TRITURACIÓN Y APILAMIENTO CERRO MATOSO S.A. MONTELÍBANO –  
COLOMBIA, DESDE EL ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y  
DISPONIBILIDAD ALCANZADA

IVAN ENRIQUE PUPO MALABET

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MEDELLÍN - COLOMBIA  
2014



ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN EN LÍNEA DE  
TRITURACIÓN Y APILAMIENTO CERRO MATOSO S.A. MONTELÍBANO –  
COLOMBIA, DESDE EL ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y  
DISPONIBILIDAD ALCANZADA

IVAN ENRIQUE PUPO MALABET

Trabajo de tesis para otorgar el título de Magister en Ingeniería modalidad  
profundización en Mantenimiento Industrial

DIRECTOR DE PROYECTO

DR. PhD. ALBERTO MORA GUTIÉRREZ

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MEDELLÍN - COLOMBIA  
2014

## CONTENIDO

	Pág.
CONTENIDO .....	4
ILUSTRACIONES.....	8
ECUACIONES.....	11
0. PRÓLOGO .....	12
0.1 INTRODUCCIÓN.....	12
0.2 ANTECEDENTES .....	13
0.3 JUSTIFICACIÓN .....	14
0.4 OBJETIVOS .....	15
0.4.1 General.....	15
0.4.2 Específicos.....	15
1. FUNDAMENTOS CONCEPTO DE CMD .....	13
1.1 OBJETIVO.....	13
1.2 INTRODUCCIÓN.....	13
1.3 FUNDAMENTOS CMD.....	14
1.3.1 Confiabilidad.....	14
1.3.2 Mantenibilidad.....	14
1.3.3 Disponibilidad.....	15

1.3.4 Niveles del mantenimiento.....	20
1.4 CALCULO DE LOS PARAMETROS <i>CMD</i> .....	21
1.4.1 Modelo universal para pronosticar <i>CMD</i> .....	21
1.4.2 Estimación de parámetros. ....	25
1.4.2.1 Método gráfico en papeles de alineación. ....	26
1.4.2.2 Método de mínimos cuadrados. ....	26
1.4.2.3 Método de máxima verosimilitud. ....	27
1.4.3 Distribuciones. ....	28
1.4.3.1 Distribución de <i>Weibull</i> . ....	29
1.4.3.2 Distribución <i>Log-normal</i> . ....	30
1.4.3.3 Distribución <i>normal</i> . ....	30
1.4.3.4 Distribución <i>exponencial</i> . ....	30
1.4.3.5 Distribución <i>Gamma</i> . ....	31
1.4.4 Curva de <i>Davies</i> . ....	31
1.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO .....	32
2 DESCRIPCIÓN DE LITRAC .....	33
2.1 OBJETIVO.....	33
2.2 INTRODUCCIÓN.....	33
2.3 CARACTERISTICAS DE <i>LITRAC</i> .....	35
2.3.1 Descripción de LITRAC en nivel II de mantenimiento. ....	35
2.3.1.1 Acciones correctivas. ....	35
2.3.1.2 Acciones bajo un plan. ....	41
2.3.2 Descripción de LITRAC en nivel III de mantenimiento. ....	44
2.3.3 Descripción de LITRAC en nivel IV de mantenimiento. ....	45

2.4	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO .....	45
3.1	OBJETIVO.....	46
3.2	INTRODUCCIÓN.....	46
3.3	ANÁLISIS CMD EN LITRAC.....	47
3.3.1	Análisis con el método puntual. ....	47
3.3.2	Análisis con el método distribuciones. ....	47
3.3.3	Pronósticos.....	56
3.4	CONCLUSIONES DEL CAPITULO .....	67
4	ESTRATEGIA.....	69
4.1	OBJETIVO.....	69
4.2	INTRODUCCIÓN.....	69
4.3	ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS PARA LITRAC .....	70
4.3.1	Análisis de los Betas de LITRAC. ....	70
4.3.1.1	Análisis de los Betas planeados Preventivos-Predictivos.....	70
4.3.3.2	Análisis de los Betas no planeados Mantenimiento Correctivo. ....	71
4.3.2	Análisis de Etas de LITRAC.....	72
4.3.2.1	Análisis de Etas planeados preventivo-predictivos. ....	72
4.3.2.2	Análisis de Etas no planeados Mantenimiento Correctivo. ....	73
4.3.2.3	Análisis de los tiempos útiles de Producción y de Mantenimiento. ....	73
4.3.3	Tácticas y acciones de mantenimiento para LITRAC.....	75
4.3.3.1	Tácticas y acciones de mantenimiento para MTBMc. ....	75
4.3.3.2	Tácticas y acciones de mantenimiento para MTTR. R. ....	76
4.4	CONCLUSIONES DEL CAPITULO.....	77

5.0 CONCLUSIONES .....	78
5.1 OBJETIVO .....	78
5.2 CONCLUSIONES .....	78
6.0 RECOMENDACIONES.....	78
7.0 ANEXOS. ....	80
BIBLIOGRAFÍA.....	82

## ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Secuencia lógica de objetivos.....	16
Ilustración 2. Siglas y nomenclaturas.....	15
Ilustración 3. Niveles de mantenimiento.....	21
Ilustración 4. Modelo universal e integral, propuesto para la medición <i>CMD</i> . ....	23
Ilustración 5. Ajuste de una línea recta en los ejes X o Y.....	26
Ilustración 6. Método de máxima verosimilitud.....	28
Ilustración 7. Parámetro de forma Beta de Weibull. ....	29
Ilustración 8. Curva de Davies. ....	31
Ilustración 9. Serie del sistema de trituración y apilamiento LITRAC. ....	33
Ilustración 10. Inventario de elementos nivel instrumental. ....	34
Ilustración 11. Rangos de duración DT versus % horas acumuladas.....	36
Ilustración 12. Rangos de duración DT versus % de eventos acumulados. ....	36
Ilustración 13. Eventos DT rango $[0 < DT < 1h]$ . ....	37
Ilustración 14. Eventos DT rango $[2,01 < DT < 4h]$ . ....	38
Ilustración 15. Eventos DT rango $[4,01 < DT < 8h]$ . ....	38
Ilustración 16. Eventos DT rango $[8,01 < DT < 20h]$ . ....	39
Ilustración 17. Eventos DT rango $[20,1 < DT < 50h]$ . ....	39
Ilustración 18. Eventos DT rango $[50,1 < DT < 120 h]$ . ....	40
Ilustración 19. Mantenimiento Preventivo en LITRAC.....	41
Ilustración 20. Rangos de duración Mp en LITRAC. ....	42
Ilustración 21. Horas de <i>PM02</i> de LITRAC. ....	43

Ilustración 22. Horas de <i>PM01</i> de LITRAC. ....	43
Ilustración 23. Variables por el método puntual. ....	47
Ilustración 24. Datos de referencia mes de julio 2010. ....	48
Ilustración 25. Paquete informático VALRAMOR4. ....	49
Ilustración 26. Paquete informático WEIBULL ++Versión 6. ....	50
Ilustración 27. Comparación de resultados de ambos paquetes informáticos. ....	50
Ilustración 28. Cálculo de dos o más meses de cada variable. ....	50
Ilustración 29. Resultados de $MTBM_C$ , de LITRAC. ....	51
Ilustración 30. Resultados de MTTR de LITRAC. ....	52
Ilustración 31. Resultados de $MTBM_p$ de LITRAC. ....	53
Ilustración 32. Resultados de $M_p$ de LITRAC. ....	54
Ilustración 33. Cálculo por distribuciones. ....	56
Ilustración 34. Comparación de diferencia de valores. ....	56
Ilustración 35. Fundamentación científica de las Series Temporales. ....	57
Ilustración 36. Revisión del Nivel de la serie. ....	59
Ilustración 37. Revisión del Ruido de la serie por software Statgraphics. ....	60
Ilustración 38. Revisión de tendencia de la serie por software Statgraphics. ....	60
Ilustración 39. Revisión de la tendencia de la serie. ....	61
Ilustración 40. Revisión de la Estacionalidad de la serie. ....	61
Ilustración 41. Revisión de la Ciclicidad de la serie. ....	62
Ilustración 42. Síntesis del análisis previo de la serie. ....	62
Ilustración 43. Preparación de recortes de la serie. ....	63
Ilustración 44. Comparación cuatro primeros modelos de pronósticos de la serie. ....	63
Ilustración 45. Cuadro para seleccionar el mejor método de pronóstico. ....	64

Ilustración 46. Prueba de bondad de ajuste para doce variables. ....	64
Ilustración 47. Bondad de Ajuste contra la realidad de los cuatro tiempos. ....	65
Ilustración 48. Pronóstico de la variable 1 - $\beta$ del MTBM <sub>C</sub> . ....	66
Ilustración 49. Pronósticos finales de Acciones de Reparación. ....	66
Ilustración 50. Pronósticos finales de Acciones de Mantenimiento. ....	66
Ilustración 51. Disponibilidades Alcanzadas para pronósticos. ....	67
Ilustración 52. Deber ser del mantenimiento. ....	69
Ilustración 53. Betas de LITRAC. ....	70
Ilustración 54. Comparativo de Betas Preventivo & Correctivo. ....	71
Ilustración 55. Etas de LITRAC. ....	72
Ilustración 56. Tiempos de Producción y Mantenimiento. ....	74
Ilustración 57. Tiempos de mantenimiento. ....	74
Ilustración 58. Resumen acciones MTBM <sub>C</sub> . ....	75
Ilustración 59. Resumen acciones MTTR. ....	76
Ilustración 60. Resumen acciones MTBM <sub>p</sub> . ....	76
Ilustración 61. Resumen de acciones Mp. ....	77

## ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Disponibilidad Genérica sin mantenimientos preventivos $A_g$ .....	16
Ecuación 2. Disponibilidad Genérica con mantenimiento preventivo $A_g$ .....	17
Ecuación 3. Transformaciones de $MTBF$ , $UT$ , $MTTR$ , $DT$ etcétera. ....	17
Ecuación 4. Disponibilidad Inherente $A_i$ .....	17
Ecuación 5. Disponibilidad Alcanzada $A_a$ .....	18
Ecuación 6. Tiempo medio entre mantenimientos $MTBM$ .....	18
Ecuación 7. Tiempo medio de mantenimiento activo $\bar{M}$ .....	19
Ecuación 8. Disponibilidad Operacional $A_o$ .....	19
Ecuación 9. Tiempo medio de mantenimiento activo incluyendo $LTD$ , $\bar{M}'$ .....	20
Ecuación 10. Disponibilidad Operacional Generalizada $A_{go}$ .....	20
Ecuación 11. Análisis de mínimos cuadrados.....	27
Ecuación 12. Definición matemática de la pendiente de la recta.....	27
Ecuación 13. Función de máxima verosimilitud. ....	28

## 0. PRÓLOGO

### 0.1 INTRODUCCIÓN

La sociedad anónima Cerro Matoso está en el kilómetro 22 de la carretera sur oeste Montelíbano, (Córdoba), es una empresa del sector minero de Colombia, su gestión de mantenimiento presenta grandes cambios en los últimos ocho (8) años.

La planta tiene tres grandes áreas de proceso, un área de preparación de minerales, un área de calcinación fundición y un área de refinación. El área escogida para realizar análisis de parámetros *CMD*<sup>1</sup>, es la línea de trituración y apilamiento de *CMSA*<sup>2</sup> (*LITRAC*)<sup>3</sup> en el área de preparación de mineral. El trabajo consta de seis capítulos, se desarrolla para mejorar la gestión de mantenimiento y operación de *LITRAC*.

El primer capítulo trata sobre los fundamentos de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad alcanzada. Se definen las relaciones y características de cada una de ellas. Se toman las definiciones de escritores expertos en el tema para construir un conocimiento sobre parámetros *CMD*.

El segundo capítulo trae una descripción del estado actual del nivel dos (Nivel operacional) del mantenimiento. Explica el conjunto de acciones que se aplican en el nivel tres (Nivel táctico) y puntualiza en el nivel cuarto (Nivel estratégico), las estrategias actualmente en uso.

El tercer capítulo describe el análisis de la situación actual de *LITRAC* desde el punto de vista del análisis *CMD*. El pronóstico permite un análisis con un enfoque futurista.

El cuarto capítulo plantea un conjunto de acciones que mejoran la productividad y la competitividad de *LITRAC* resultado del análisis de los parámetros *CMD*.

El quinto capítulo describe las tácticas, acciones y recomendaciones para evitar el deterioro en la productividad y la competitividad en *LITRAC*.

El sexto capítulo reúne las referencias bibliográficas que dieron apoyo al trabajo.

---

<sup>1</sup> *CMD Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad.*

<sup>2</sup> *CMSA Cerro Matoso S.A.*

<sup>3</sup> *LITRAC Línea de trituración y apilamiento Cerro Matoso S. A.*

## 0.2 ANTECEDENTES

La operación minera y producción piro-metalúrgica de *CMSA* inicio operaciones en el año mil novecientos ochenta y dos (1982). Durante los primeros dieciocho años la planta tiene una línea de producción; en el año dos mil (2000) se integra a la operación, la segunda línea para aumentar la producción final de ferróníquel.

Este cambio implica repotenciar las líneas existentes para evitar las restricciones en la línea de proceso. Antes de la entrada en operación de la segunda línea, el tiempo mensual disponible sin operar de *LITRAC* era del cincuenta por ciento, después de la entrada en servicio de la segunda línea se disminuye el tiempo disponible sin operar al veinte por ciento. Este cambio de los tiempos operativos implica la reducción de los tiempos disponibles para realizar las actividades de mantenimiento preventivo.

A partir del año dos mil once (2011), el tiempo disponible para mantenimiento se reduce a la mitad por diversos factores ajenos al área de mantenimiento de la planta, la situación actual es que el tiempo disponible para mantenimiento mensual está en diez por ciento del tiempo total del mes, con tendencias a disminuir a valores cercanos al seis por ciento mensual. Esta situación afecta la confiabilidad y la disponibilidad de la línea.

El crecimiento del tiempo operativo de las máquinas de la línea y la disminución del tiempo para mantenimiento<sup>4</sup> es una combinación que requiere acciones de ingeniería de mantenimiento para poder garantizar el funcionamiento de la línea de forma segura y confiable.

---

<sup>4</sup> El tiempo para mantenimiento se llama ventana para mantenimiento.

### 0.3 JUSTIFICACIÓN

La inestable situación de la economía mundial, mueve con tendencia decreciente los precios mundiales de los commodities entre ellos los metales, como el Níquel.

Al aumentar la entrada de nuevos proyectos de explotación y producción, la oferta en el mercado mundial es mayor y los precios decrecen.

La disminución de la demanda como resultado de la desaceleración de las economías que lideran el crecimiento del producto bruto mundial; es otra causa de la tendencia decreciente de los precios de los metales y minerales,

Las compañías productoras de Níquel se enfrentan con los precios bajos del metal en niveles históricos, esta situación exige ser más competitivos. En nuestro entorno el precio de venta lo decreta el mercado mundial a través del *LME*<sup>5</sup>, el costo por libra de producto y la calidad son variables a controlar con los procesos administrativos y productivos de cada productor.

El reto de hoy es sobrevivir en el mercado. La competitividad de las empresas es un punto muy importante, escribe Romo y Abdel la competitividad es obtener costos de producción tan bajos o más bajos que nuestros competidores y comparar contra el precio del mercado mundial para generar una utilidad es el objetivo de las compañías (Sobre el concepto de competitividad, 2005).

La respuesta a esta situación se plantea con un análisis de parámetros universales *CMD* donde los resultados orientan las acciones de mantenimiento en el nivel táctico que generen la optimización de los procesos de mantenimiento y operación, el objetivo es mantener el nivel deseado de la confiabilidad y la disponibilidad alcanzada de *LITRAC*.

---

<sup>5</sup> *LME*= London Metal Exchange.

## 0.4 OBJETIVOS

### 0.4.1 General.

Optimizar los procesos de mantenimiento y producción, en *LITRAC*, a partir del análisis de parámetros universales *CMD*.

### 0.4.2 Específicos.

#### Capítulo 1:

Fundamentar los conceptos de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad alcanzada en sistemas de producción. – Nivel 1 – Conocer.

#### Capítulo 2:

Describir la situación actual de los niveles Operacional, Táctico y Estratégico del mantenimiento en *LITRAC*. – Nivel 2 – Comprender.

#### Capítulo 3:

Esbozar los valores *CMD* actuales y futuros, mediante su valoración con los métodos: puntual y de distribución con Disponibilidad Alcanzada en *LITRAC*. – Nivel 3 – Aplicar.

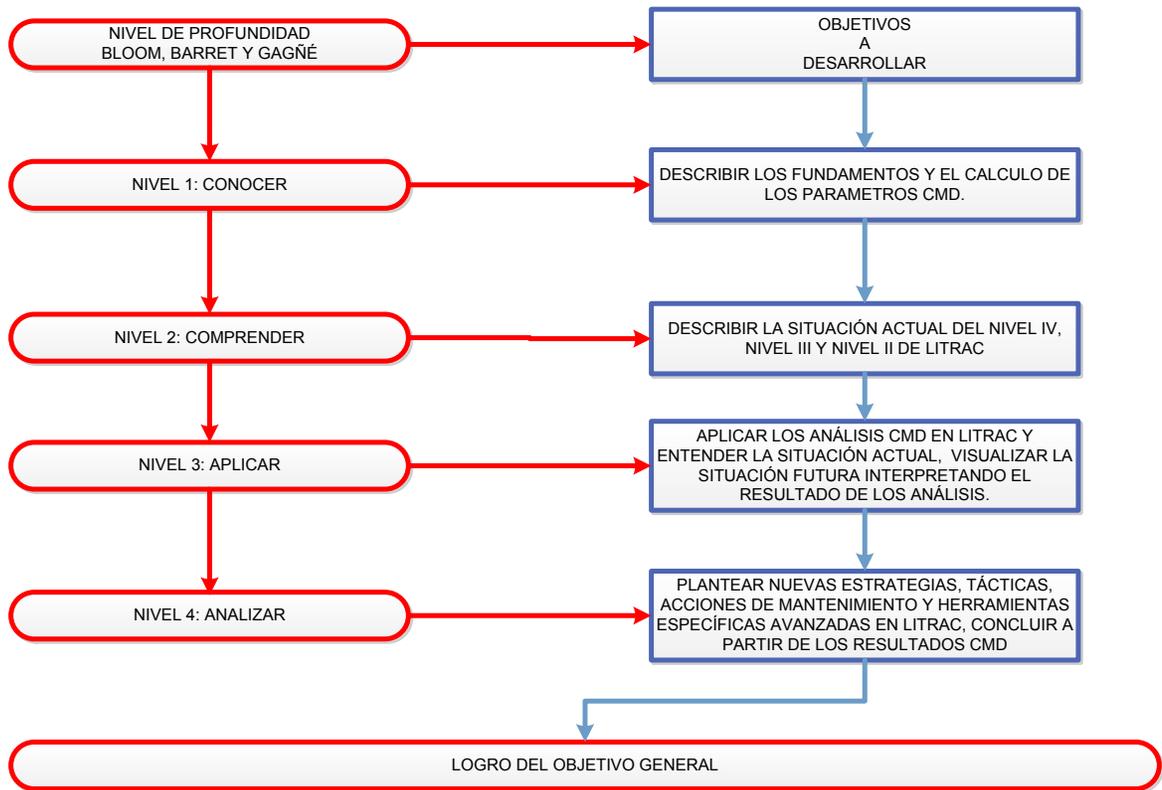
#### Capítulo 4:

Plantear estrategias, tácticas, acciones de mantenimiento y herramientas específicas avanzadas en *LITRAC*, para alcanzar un nivel de mantenimiento efectivo deseado a partir de la interpretación de curvas *CMD*. – Nivel 4 – Analizar.

#### Capítulo 5:

Proponer las conclusiones y las recomendaciones a seguir en *LITRAC*.

Ilustración 1. Secuencia lógica de objetivos.



## 1. FUNDAMENTOS CONCEPTO DE CMD

### 1.1 OBJETIVO

Fundamentar los conceptos de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad Alcanzada en sistemas de producción.

### 1.2 INTRODUCCIÓN

Los fundamentos de esta investigación se soportan en los conceptos del enfoque sistémico kantiano e integral, el uso y aplicaciones de métodos puntuales y de distribución para calcular los parámetros universales del método *CMD*; Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad.

El Mantenimiento es una ciencia, esta definición facilita que se desarrollen los conocimientos que se derivan de la práctica industrial y se establezcan diferentes principios y leyes de aceptación universal.

Luis Mora describe el enfoque sistémico kantiano como un sistema de tres elementos personas, artefactos y entorno (Mora, 2009). Las personas son el primer elemento del sistema kantiano, generan participación y fundamentan en el aspecto mental la existencia del sistema.

El segundo elemento del sistema kantiano son los artefactos. Para el Mantenimiento este elemento lo ocupa las máquinas, los sistemas de producción, los sistemas informáticos de mantenimiento, los repuestos, herramientas y todos aquellos elementos reales necesarios para poder cumplir su función como sistema.

El tercer y último elemento del sistema kantiano es el entorno corresponde a los sitios donde se desarrolla la naturaleza del sistema, es la ubicación donde están las máquinas que conforman el proceso productivo.

El enfoque kantiano de mantenimiento se define como ingeniería de fábricas, indica que las unidades básicas de mantenimiento y operación, tienen relación

directa con las máquinas, la relación entre mantenedores y las máquinas es la Mantenibilidad; la relación entre operadores y las máquinas es la Confiabilidad.

La disponibilidad es la medida universal para evaluar cómo se comportan las máquinas, que tipo de fallas ocurren; cuántas de estas se producen en un periodo de tiempo definido. Al usar esta medición el elemento humano correspondiente a las unidades básicas de producción y de mantenimiento crea entendimiento del comportamiento del único elemento común a ambos, las máquinas.

### 1.3 FUNDAMENTOS CMD

#### 1.3.1 Confiabilidad.

La confiabilidad es uno de los elementos del *CMD*, algunos autores la llaman fiabilidad, según Nachlas: fiabilidad es la probabilidad de que un dispositivo realice adecuadamente su función prevista a lo largo del tiempo, durante su operación en el entorno de diseño.

En este trabajo usaremos el termino de confiabilidad en remplazo de fiabilidad. La definición de confiabilidad tiene cuatro características que la determinan como estructura: probabilidad, funcionamiento adecuado o desempeño satisfactorio, calificación con respecto al entorno o condiciones específicas y el periodo (Mora, 2009) (Nachlas, 1995).

La confiabilidad y la mantenibilidad se definen en términos de probabilidad. Usar la forma clásica de la probabilidad es el resultado de dividir el número de veces de los casos en estudio entre el número total de casos, en la manera que el número de casos sea mayor, la probabilidad se vuelve más exacta y cercana a su valor real. La práctica indica la ventaja de usar más de treinta y un experimentos para obtener valores más precisos (Blanchard, y otros, 1994).

#### 1.3.2 Mantenibilidad.

La Mantenibilidad según Knezevic es: la característica inherente de un elemento en asocio a su capacidad para recuperarse para el servicio en el momento que se realiza la tarea de mantenimiento según se especifica (Knezevic, 1993).

Según Dhillon la mantenibilidad tiene unos principios generales estos incluyen: reducir o eliminar en su totalidad la necesidad para mantener; reducir los costos de mantenimiento del ciclo de vida; bajar el número, la frecuencia y la complejidad de las tareas de mantenimiento; establecer el grado de mantenimiento preventivo a realizar; reducir el tiempo medio para reparar y proveer máxima intercambiabilidad (Dhillon, 1999) (U.S. Army, 1972).

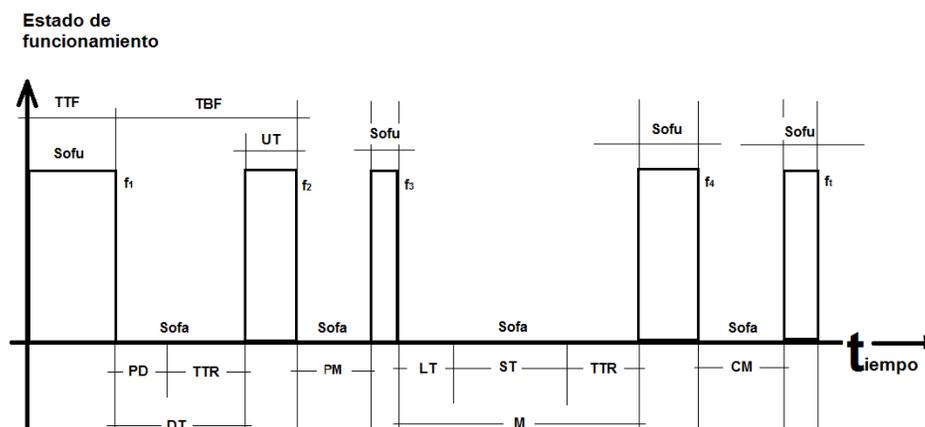
El estado de fallo de un equipo se establece por el tiempo en que duren las tareas de mantenimiento para recuperar la funcionalidad del mismo. El análisis de este periodo lo estudia la Mantenibilidad. El diseño de facilidades para mantenimiento tiene una relación directa con la rapidez de la intervención.

Se representa por  $M(t)$ , es la función de distribución de la variable aleatoria  $TTR$  (*Time to repair*), esto significa la probabilidad que la variable aleatoria tenga un valor igual o menor que algún valor particular a  $t$ . Para la mantenibilidad significa la probabilidad de que la función del sistema se recobre en el momento de mantenimiento o antes (Knezevic, 1996).

### 1.3.3 Disponibilidad.

La disponibilidad es una medida de la probabilidad que un equipo funcione en sus parámetros de diseño en el instante en que se solicite, una vez se inicie su producción bajo condiciones estables (Ramakumar, 1996) (Blanchard, 1995) (Nachlas, 1995) (Smith, 1983) .

Ilustración 2. Siglas y nomenclaturas.



Donde:  $TTF$  Tiempo hasta fallar.  $TBF$  Tiempo entre fallas.  $UT$  tiempo útil en que el equipo funciona correctamente.  $DT$  Tiempo no operativo.  $f_i$  Falla  $i$ -ésima.  $TTR$

Tiempo que demora la reparación. *CM* Tiempo que demora la reparación correctiva o modificativa. *PM* Tiempo de mantenimientos planeados. *LT* Tiempos logísticos o administrativos. *ST* Tiempo de entrega de repuestos insumos o recursos humanos. *NTTR* Tiempo neto para reparar. *PD* retrasos de producción para informar y notificar a mantenimiento de la no funcionalidad del equipo (Mora, 2009).

El análisis de la disponibilidad requiere conocer cuáles son los datos que se deben tener en cuenta para su cálculo. Se crea un perfil de funcionalidad del equipo cuando sus datos de funcionamiento y parada llevan un registro. Se define *SoFu* como estado de funcionamiento y *SoFa* estado de falla. Se referencian las siguientes disponibilidades:

Disponibilidad genérica. Se aplica a partir del uso de los *UT* y *DT*, es muy útil donde no hay un desglose de las pérdidas de tiempo que afectan el tiempo total de *DT*. Es una disponibilidad que suele ser usada para los inicios en procesos donde se quiere medir este parámetro (Mora, 2009).

Hay dos cálculos de la disponibilidad genérica, uno que no tiene en cuenta los mantenimientos preventivos y otra que si los tiene.

Ecuación 1. Disponibilidad Genérica sin mantenimientos preventivos  $A_g$ .

$$A_g = \frac{\text{Media de los tiempos útiles con funcionamiento}}{\text{Media de tiempos útiles} + \text{Media de tiempos de no funcionalidad}}$$

$$A_g = \frac{\frac{\sum_{i=1}^m UT_i}{m}}{\frac{\sum_{i=1}^m UT_i}{m} + \frac{\sum_{j=1}^n DT_j}{n}}$$

$UT_i$  Tiempos útiles.  $DT_j$  Tiempos no funcionales de la máquina.  $m$  Número de eventos de *UT*;  $n$  Número de eventos de *DT*.

Se asume que no hay acciones planeadas  $M_p$  dentro de los tiempos *DT*. Esta disponibilidad se mide en porcentaje, las demás medidas *UT*, *DT*,  $MUT^6$  y  $MDT^7$  se miden en unidades de tiempo: horas, minutos, etcétera (Mora, 2009).

---

<sup>6</sup>  $MUT$  = Promedio de los tiempos útiles individuales.

<sup>7</sup>  $MDT$  = Promedio de los tiempos de no disponibilidad individuales.

Ecuación 2. Disponibilidad Genérica con mantenimiento preventivo  $A_g$ .

$$A_g = \frac{\text{Tiempo funcionamiento}}{\text{Tiempo en que se puede operar}} = \frac{TT - \sum PM - \sum DT}{TT - \sum PM}$$

$TT$  Tiempos totales.  $PM$  Tiempo de mantenimiento preventivo. (Mora, 2009).

En la disponibilidad genérica se cumplen las siguientes transformaciones.

Ecuación 3. Transformaciones de  $MTBF$ ,  $UT$ ,  $MTTR$ ,  $DT$  etcétera.

$MTBF = UT + DT$ , siempre y cuando  $UT \gg \gg \gg \gg \gg DT$  luego  $MTBF \cong UT$

$DT = LDT + MTTR$ , con  $LDT$  despreciable o igual a cero luego  $DT \cong MTTR$

$LDT$  Tiempos de demora logísticos.  $MTBF$  Tiempo medio entre fallos.  $MTTR$  Tiempo medio para reparar. (Mora, 2009).

Disponibilidad inherente. Se aplica a partir del uso del  $MTBF^8$  y el  $MTTR^9$ , es muy útil donde se desea controlar las actividades  $CM$  (Mantenimiento correctivo o modificativo), tiene algunas restricciones, estas son: los tiempos útiles  $UT$  deben ser mucho mayores que los tiempos no disponibles  $DT$ , en una proporción de 8:1 o más; los tiempos de retrasos o demoras administrativas  $LT$ , deben ser mínimos tienden a cero.

El cálculo de la disponibilidad inherente o intrínseca es a partir de la disponibilidad genérica, usa las transformaciones de la ecuación 3. Tiene en consideración que el  $MTTR$  es solo atribuible a la duración de la reparación (Mora, 2009).

Ecuación 4. Disponibilidad Inherente  $A_i$ .

$$A_g = \frac{MUT}{MUT + MDT} \text{ se transforma en Disponibilidad inherente } = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

(Mora, 2009).

---

<sup>8</sup>  $MTBF$ = Tiempo medio entre fallos.

<sup>9</sup>  $MTTR$ = Tiempo medio entre reparaciones.

Disponibilidad alcanzada. Se aplica a partir del uso del  $MTBM$ ,  $MTBM_c$ ,  $MTBM_p$ ,  $MTTR$ ,  $M_p$ ,  $\bar{M}$ , es muy útil donde se desea controlar actividades de mantenimiento planeadas y las no planeadas por separado. No tiene en cuenta los tiempos logísticos, ni los administrativos y los de demora por suministro de repuestos. Esta es la disponibilidad que ha sido escogida para usar en el cálculo de parámetros  $CMD$  en este proyecto.

La disponibilidad alcanzada es la relación entre el tiempo medio entre mantenimientos  $MTBM$  y la suma del tiempo medio de mantenimiento  $\bar{M}$  más el tiempo medio entre mantenimientos  $MTBM$ .

Ecuación 5. Disponibilidad Alcanzada  $A_a$ .

$$\text{Disp. alcanzada} = A_a = \frac{MTBM}{MTBM + \bar{M}}$$

(Mora, 2009).

Los términos de la ecuación 5, el tiempo medio entre mantenimientos  $MTBM$ , es un indicador de la frecuencia de los mantenimientos, es función de la frecuencia de los mantenimientos planeados y no planeados, cuando no hay mantenimientos preventivos el  $MTBM$  se aproxima la  $MTBF$  (Blanchard, y otros, 1994).

Ecuación 6. Tiempo medio entre mantenimientos  $MTBM$ .

$$MTBM = \frac{1}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}}$$

(Mora, 2009).

El tiempo medio de mantenimiento  $\bar{M}$  es el tiempo medio de mantenimiento activo que se necesita para efectuar una tarea de mantenimiento. Es función de los tiempos medios de mantenimiento correctivo y mantenimiento planeado, sus frecuencias aplicadas, solo tiene en cuenta tiempos activos de mantenimiento, no cuenta los tiempos administrativos y los del tipo logístico (Blanchard, y otros, 1994).

Ecuación 7. Tiempo medio de mantenimiento activo  $\bar{M}$ .

$$\bar{M} = \frac{\frac{MTTR}{MTBM_c} + \frac{M_p}{MTBM_p}}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}}$$

$MTBM_c$  Tiempo medio entre mantenimientos no planeados.  $MTBM_p$  Tiempo medio entre mantenimientos planeados.  $MTTR$  Tiempo neto medio para realizar la reparación.  $M_p$  Tiempo neto medio para ejecutar las tareas proactivas. (Mora, 2009).

Disponibilidad operacional. Se aplica a partir del uso de los mismos elementos de la disponibilidad alcanzada agregando los parametros:  $ADT$ ,  $LDT'$  y  $LDT$ , es muy útil para controlar los tiempos de demoras administrativos, recursos humanos o físicos disponibles y trabaja al igual que la alcanzada con las actividades de mantenimiento planeadas y no planeadas. Los expertos indican que su calculo es costoso (Mora, 2009).

$ADT$  Tiempos de demora administrativos;  $LDT'$  Tiempos logísticos de demora físicos.  $LDT$  Tiempos logísticos Totales.

Ecuación 8. Disponibilidad Operacional  $A_o$ .

$$\text{Disp. operacional} = \frac{MTBM}{MTBM + M'}$$

(Mora, 2009).

En la ecuación 9 el termino  $\bar{M}'$  se calcula exactamente igual que el  $\bar{M}$  (Ecuación 10) la diferencia se encuentra al hacer el cálculo del termino  $MTTR$ , donde al escoger cada  $TTR_i, \dots, TTR_n$  neto se le adiciona sus  $LDT$  ( $LDT = ADT + LDT'$ ) correspondientes a cada reparación.

De la misma manera se hace para calcular  $M_p$  se incluyen los tiempos  $LDT$  para cada mantenimiento.

Ecuación 9. Tiempo medio de mantenimiento activo incluyendo *LTD*,  $\bar{M}'$ .

$$\bar{M}' = \frac{\frac{MTTR}{MTBM_c} + \frac{M_p}{MTBM_p}}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}}$$

(Mora, 2009).

Disponibilidad operacional generalizada. Se aplica a partir de los elementos de la disponibilidad operacional, agregando el parametro de *Ready Time*, es muy útil cuando los equipos estan operando pero no estan produciendo. Es una disponibilidad muy completa, compleja, de mayor exigencia y costo para su implementación (Mora, 2009).

Ecuación 10. Disponibilidad Operacional Generalizada Ago.

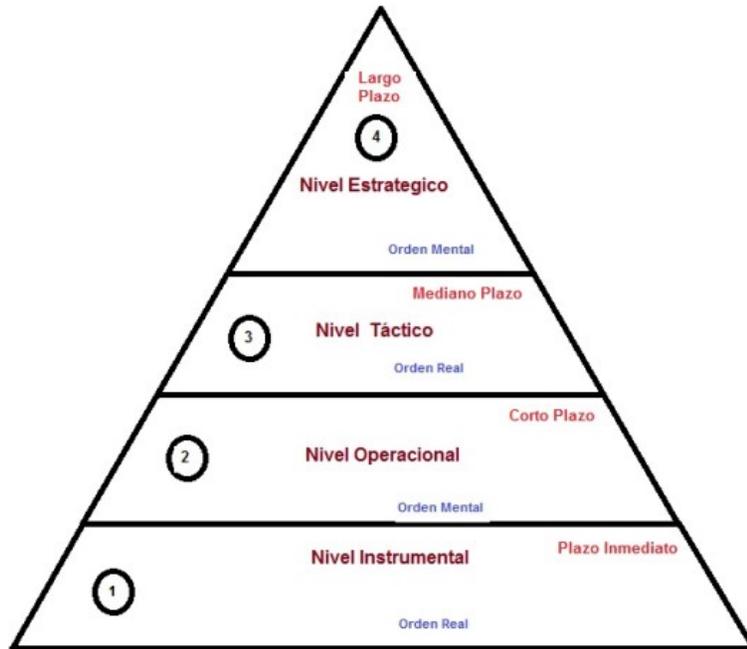
$$\text{Disp. operacional generalizada} = \text{Ago} = \frac{MTBM'}{MTBM' + \bar{M}'}$$

(Mora, 2009).

#### 1.3.4 Niveles del mantenimiento.

En el enfoque kantiano, el espacio y el tiempo son fundamentos importantes para aplicarlos en los diferentes niveles del mantenimiento. Hay cuatro niveles: nivel uno de nombre nivel instrumental, es un nivel de orden real en un plazo de tiempo inmediato; nivel dos o nivel operacional, es de orden mental en el corto plazo; nivel tres es el nivel táctico, de orden real en el mediano plazo y nivel cuatro, nivel estratégico de orden mental en el largo plazo (Mora, 2009).

Ilustración 3. Niveles de mantenimiento.



(Mora, 2009).

#### 1.4 CALCULO DE LOS PARAMETROS *CMD*

El proceso de cálculo de los parámetros universales *CMD* sigue un diagrama de decisión donde se esbozan los diferentes pasos para caracterizar una población de datos que definen el estado actual y futuro de un equipo.

##### 1.4.1 Modelo universal para pronosticar *CMD*.

Consta de seis pasos, el diagrama del paso a paso está en la ilustración 4, su objetivo calcular los parámetros *CMD* actuales y futuros de un equipo.

Paso 1.

Trata sobre las actividades para obtener, tabular, manipular y manejar los datos, de tal manera que estos sean compatibles en su forma, estilo y configuración, básicos para poder hacer los cálculos en los métodos puntuales y de distribuciones. Es importante que los datos sean reales, que tengan coherencia

cronológica, que sean de los equipos que entran en el análisis y se usen las mismas unidades de tiempo para la comparación.

#### Paso 2.

Decidir cuál es la disponibilidad más adecuada con las expectativas de la compañía, de acuerdo al nivel de mantenimiento en donde se encuentre y a la clase de datos disponibles. El cálculo de las diferentes disponibilidades está en el capítulo 1.3.3 donde se especifica las características en el perfil de funcionalidad de los tipos de tiempos SoFa y SoFu; determinar cuáles son los tipos de tiempos de demora que se tienen en cuenta para hacer los cálculos de cada disponibilidad.

En este trabajo la decisión es usar la disponibilidad alcanzada porque se tienen los datos de mantenimiento correctivo y planeado como datos reales de *LITRAC*.

#### Paso 3.

Decidir el uso del  $MLE^{10}$  que es el método de máxima verosimilitud (Este método no hace alineación), o aplicar el método de alineación con sus dos aspectos: estimación de parámetros  $F(t)$  (Función de no confiabilidad) y de  $M(t)$  (Función de mantenibilidad), con las diferentes alternativas de estimación como: *i-kaésimo*, rango de medianas con tabla, de *Benard* o *Kaplan y Meyer*.

Realizar la alineación para la función de *Weibull* en la forma gráfica o numérica de mínimos cuadrados para calcular los parámetros *beta* y *eta*. Obtener el grado de ajuste de los datos mediante la valoración de los índices de bondad.

#### Paso 4.

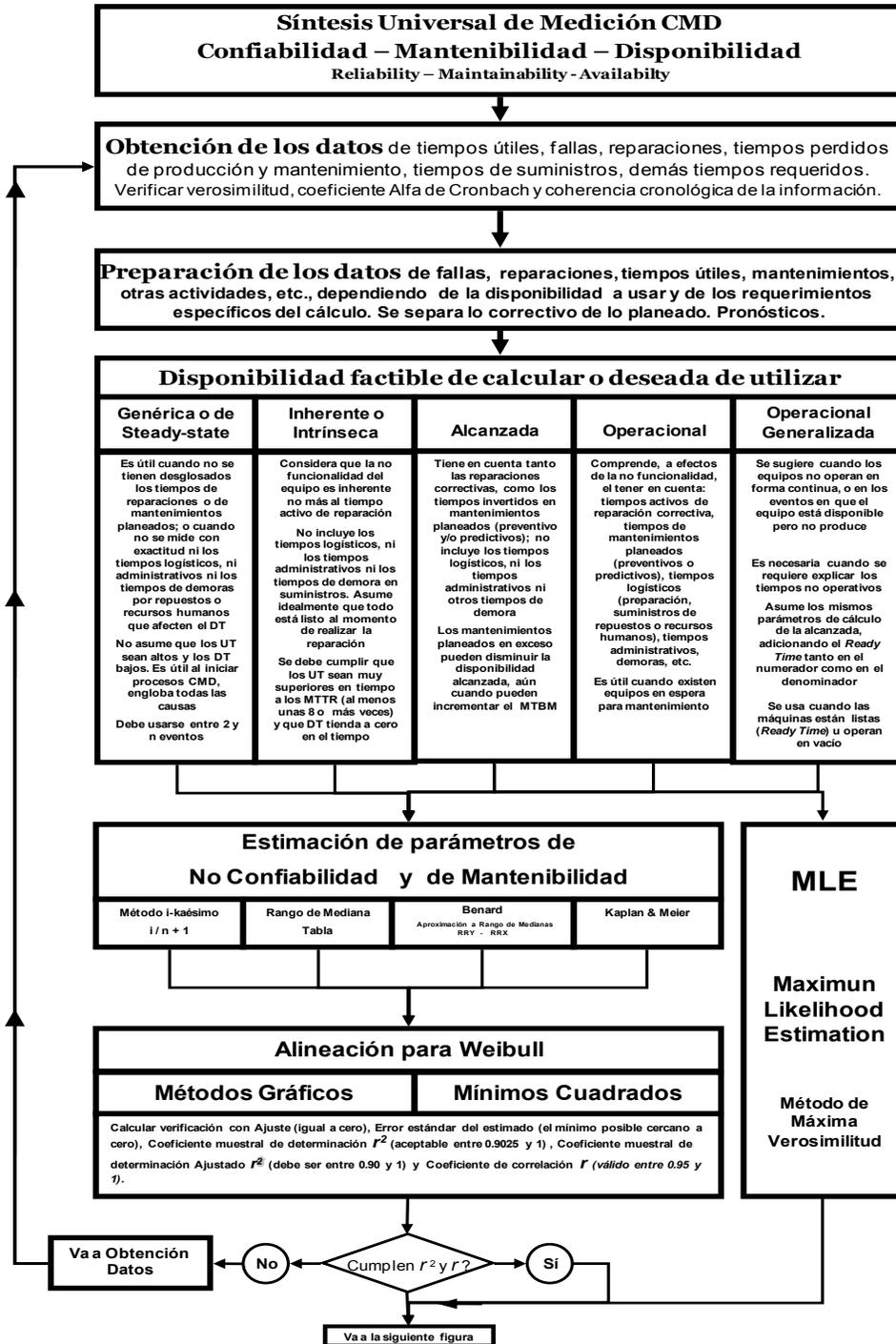
Realizar los cálculos de los parámetros de *Weibull* y validar las pruebas de bondad de ajuste, estas se realizan con tres pruebas *Kolmogórov-Smirnov*, *Anderson-Darling* y *Chi cuadrado  $Ji^2$* . Realizar la validación de bondad y ajuste para comprobar si los datos que se observan corresponden a la distribución escogida.

Un aporte de este método universal es usar la metodología de *Weibull* porque sirve para las tres etapas de la curva de *Davies* ilustración 8, en caso de que no aplique, se va directamente a la función específica que más se adecua al valor de *Beta* ( $\beta$ ) que se obtiene en esa etapa de *Weibull*. Las funciones específicas son: *Gamma*, *Log-normal*, *Normal*, *Rayleigh*, etcétera.

---

<sup>10</sup> *Maximun Likelihood Estimation = Método de máxima verosimilitud.*

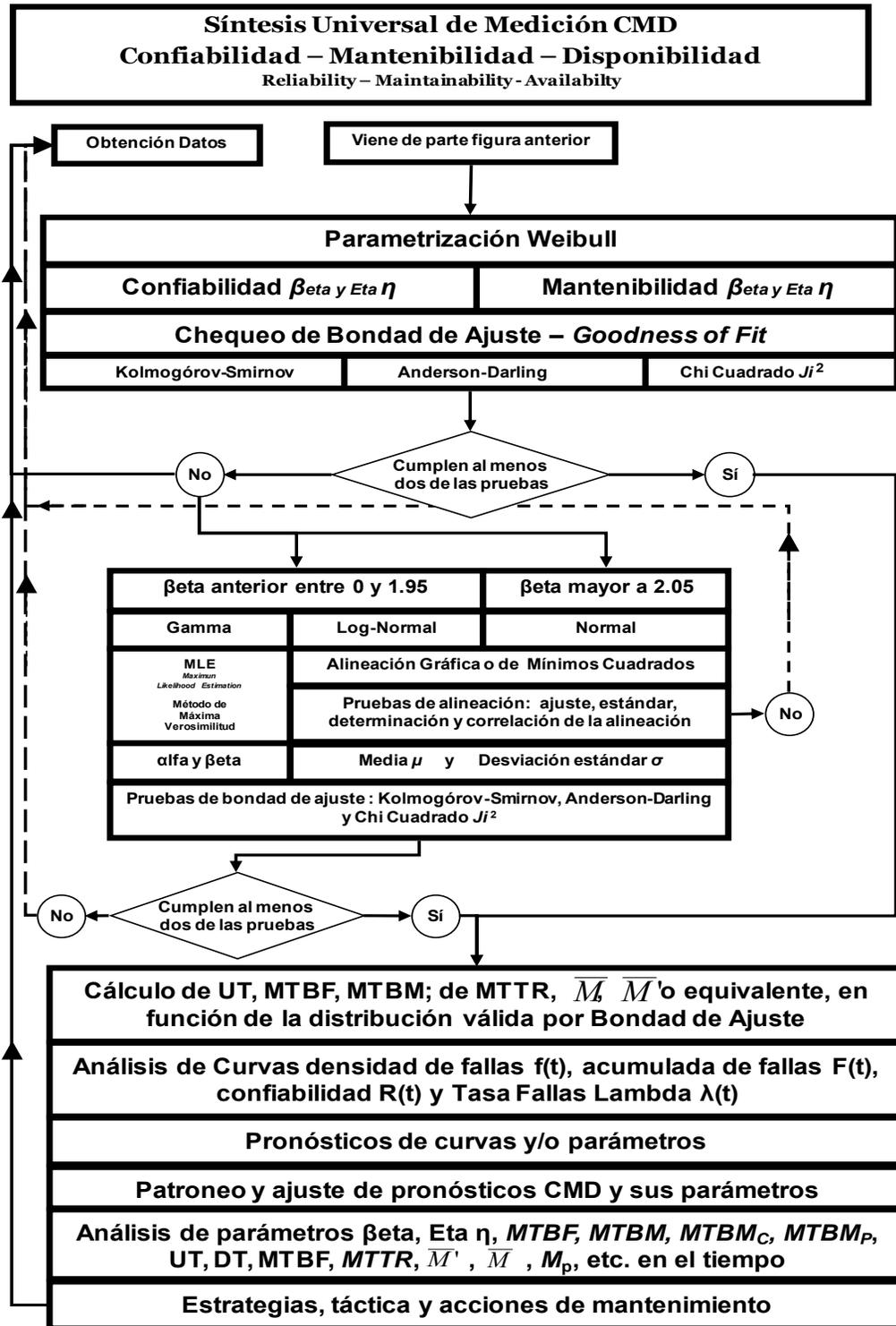
Ilustración 4. Modelo universal e integral, propuesto para la medición  $CMD^{11}$ .



Continúa en la siguiente página.

<sup>11</sup> Valido para modelos puntual y de distribuciones.

Ilustración 4. Continuación.



(Mora, 2009)

#### Paso 5.

Parametrizar y realizar alineación o *MLE* que se requiere con otra función específica diferente a Weibull para estimar sus bondades de ajuste a partir del dato de *Beta* ( $\beta$ ) resultado del cálculo en el paso cuatro; definir cuál distribución aplica de acuerdo al parámetro. El objetivo de la alineación es estimar los parámetros de una línea recta que son el intercepto y la pendiente para minimizar el error (Mora, 2009).

Las pruebas de bondades de ajuste son: *Kolmogórov-Smirnov*, *Anderson-Darling* y *Chi cuadrado  $Ji^2$* . Los datos deben pasar al menos dos pruebas de bondad; se considera aceptable cuando el coeficiente de determinación muestral  $r^2$  se encuentra en el rango 0,9 y 1,0 y el coeficiente de correlación  $r$  está en el rango 0,95 y 1,0.

#### Paso 6.

Calcular los parámetros *CMD* acorde a la función seleccionada por el alineamiento, estos son: *UT*, *MTBF*, *MTBM*, *MTBM<sub>c</sub>*, *MTTR*, *M*, *M'* o su equivalente. Analizar las curvas de densidad de falla  $f(t)$ , acumulada de fallas  $F(t)$ , confiabilidad  $R(t)$  y tasa de falla  $\lambda(t)$ . Realizar los pronósticos de curvas y parámetros.

Patronar y ajustar pronósticos *CMD*. Analizar los parámetros *Beta*, *Eta*, *MTBF*, *MTBM*, *MTBM<sub>c</sub>*, *MTTR*, *M*, *M'*,  $\bar{M}$ ,  $M_p$ , etc. en el tiempo. Definir una estrategia de mantenimiento acorde a los parámetros.

#### 1.4.2 Estimación de parámetros.

Los datos que se analizan a través de distribuciones pueden responder a diferentes características, de acuerdo con el tipo y evento que se estudia. Tipos de eventos: tiempo de funcionamiento del equipo, tiempo de operación del sistema, tiempo que tarda en repararse después de fallar (O'Connor, 2002).

La estimación de parámetros se hace en el paso tres del modelo universal de análisis *CMD*, se realiza después de la selección del modelo de distribución que mejor describe los datos.

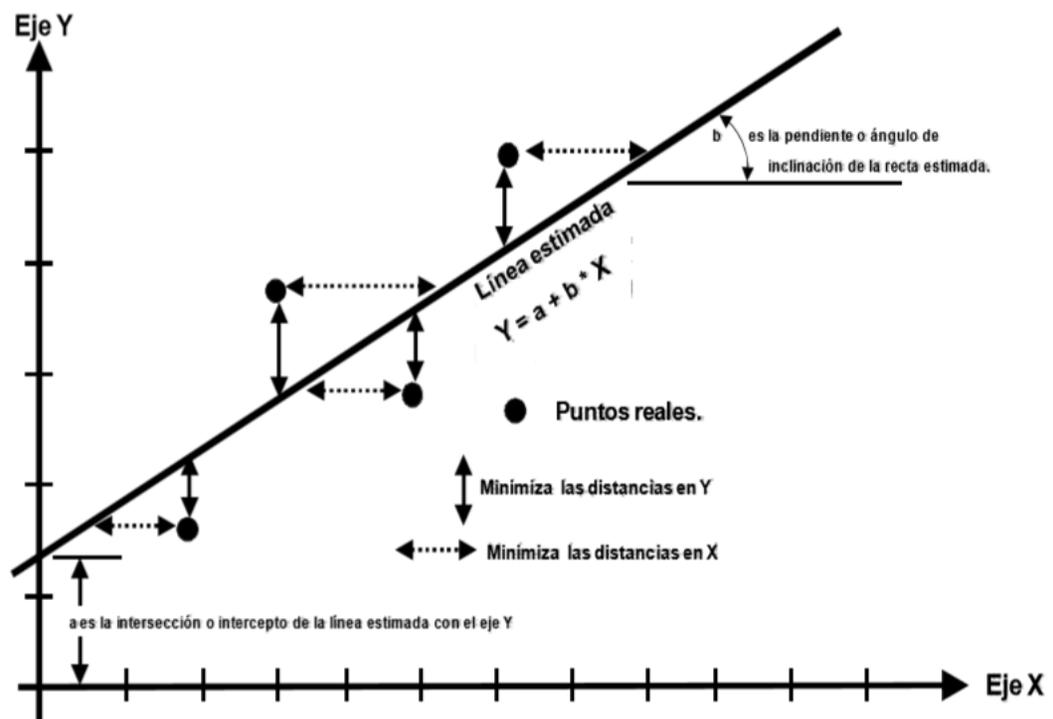
Los métodos más comunes para realizar la estimación de parámetros de una distribución son el método gráfico, el de mínimos cuadrados y el método de máxima verosimilitud (Relisoft@, 2008). Los dos primeros métodos requieren de la estimación de la función de no confiabilidad o de mantenibilidad.

1.4.2.1 Método gráfico en papeles de alineación. Los métodos se aplican para graficar los valores de  $F(t)$  o de  $M(t)$ , con sus respectivos tiempos en papeles de alineación que tienen características definidas de acuerdo con el tipo de distribución que mejor describe los datos, para alinear la función y definir los parámetros.

Se conocen el papel de Weibull o Allen Plait, los papeles de alineación de las distribuciones normales, log-normal y exponenciales. El uso de este método gráfico puede conducir a errores importantes en el análisis y en la selección de estrategias, porque tiene un componente de subjetividad (Mora, 2009).

1.4.2.2 Método de mínimos cuadrados. El método de análisis de regresión lineal con mínimos cuadrados a una línea recta busca estimar los parámetros de la pendiente y el intercepto que minimicen el componente aleatorio del error. El método requiere que una línea recta se ajuste al conjunto de datos del análisis.

Ilustración 5. Ajuste de una línea recta en los ejes X o Y.



(Mora, 2009).

Ecuación 11. Análisis de mínimos cuadrados.

$$\sum_{j=1}^N (\hat{a} + \hat{b} * x_j - y_j)^2 \min(a,b) \sum (a + b * x_j - y_j)^2$$

Dónde:  $a$  es el intercepto con el eje  $Y$  y  $b$  es la pendiente de la recta, el símbolo  $\hat{\phantom{a}}$  denota valor del cálculo,  $Y$  es la variable dependiente y  $X$  es la variable independiente. Con  $j$  como los valores diferentes de los puntos hasta  $N$  número total de puntos por alinear (Relisoft@, 2008).

La operación matemática se realiza a través de la suma de los cuadrados de las distancias de los puntos a la línea de ajuste de tal manera que esta sea mínima (Relisoft@, 2008). Las ecuaciones que ejecutan la regresión están en la ecuación 12.

Ecuación 12. Definición matemática de la pendiente de la recta.

$$b = \frac{\sum_{j=1}^N X_j * Y_j - N * \bar{X} * \bar{Y}}{\sum_{j=1}^N X_j^2 - N * \bar{X}^2} \quad a = \bar{Y} - b * \bar{X}$$

Dónde:  $b$  es el valor de la pendiente de la recta, con  $X$  como los diferentes valores independientes reales y los valores dependientes reales como  $Y$ ,  $j$  es cada uno de los puntos.  $N$  es el total de puntos.  $Y$  es la media o promedio de los  $\bar{Y}$  reales originales, y  $\bar{X}$  es la media o promedio de los  $X$  reales del caso (Levin, 1996).

1.4.2.3 Método de máxima verosimilitud. Es un método vigoroso para la estimación de parámetros, desde el punto de vista estadístico. Busca obtener el valor más probable de los parámetros de una distribución mediante la maximización de la función de máxima verosimilitud ( $L$ ) o la de su logaritmo natural ( $\Lambda$ ) para aplicar a la función densidad cuyos parámetros se van a estimar.

Este método requiere de un tamaño de muestra considerablemente alto de datos entre treinta y cincuenta a más de cien datos. Para valores pequeños puede causar discrepancias en los análisis (Mora, 2007).

Ecuación 13. Función de máxima verosimilitud.

$$L(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k | x_1, x_2, \dots, x_R) = L = \prod_{j=1}^R f(x; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$$

$$\hat{\theta} = \text{Ln}(L) = \sum_{j=1}^R \ln[f(x; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)]$$

Dónde:  $f(x_j; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ : es la función de densidad de la distribución a la que se le estiman los parámetros.  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ : parámetros por estimar.  $X_j$ : observaciones independientes de los datos de falla (Relisoft@, 2008).

Ilustración 6. Método de máxima verosimilitud.

Método de Máxima Verosimilitud				Parámetro de Forma beta		
Coloque acá primero los $t_j$ a parametrizar en forma ascendente				Parámetro de Escala Eta $\eta$		
				Valor a maximizar (suma de los $\text{Ln}(f(t_j))$ )		
				MTBF		MTTR
				196.2206		Mantenibilidad
				No Confiabilidad		
1				<div style="border: 2px solid black; padding: 10px; text-align: center;"> <p>Hunda acá para iniciar el proceso de estimación por Método Máxima Verosimilitud MLE</p> </div>		
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17			Ya terminó gracias por esperar			

(Mora, 2009).

### 1.4.3 Distribuciones.

Las distribuciones facilitan caracterizar los datos a través de la aplicación de la estadística, las siguientes distribuciones facilitan la interpretación de los parámetros CMD.

1.4.3.1 Distribución de *Weibull*. Al usar la distribución de *Weibull*<sup>12</sup> se obtiene una ventaja porque permite describir la forma en la curva de *Davies* (curva de la bañera), donde se definen las tres zonas: infancia o rodaje, madurez o vida útil y envejecimiento.

Esta distribución posee tres parámetros que le permiten una gran flexibilidad para obtener mejores ajustes (Rojas, 1975). Los parámetros de la distribución de Weibull son:

- *Gamma* – parámetro de posición ( $\gamma$ ): Indica el lapso donde la probabilidad de falla es nula, su cálculo no es fácil y usualmente se asume como valor cero (Estadística en los sistemas de confiabilidad., 1983).
- *Eta*-parámetro de escala o característica de vida útil ( $\eta$ ): Su valor es muy importante para determinar la vida útil del sistema.
- *Beta*-parámetro de forma ( $\beta$ ): Refleja la dispersión de los datos y determina la forma de la distribución. Basado en *Beta* la distribución toma varias formas y esto es lo que la adecua a la curva de *Davies*.

Ilustración 7. Parámetro de forma Beta de Weibull.

Parámetro de forma Beta de Weibull	
Valor ( $\beta$ )	Características
$0 < \beta < 1$	Tasa de falla decreciente.
$\beta = 1$	Distribución exponencial.
$1 < \beta < 2$	Tasa de falla creciente, cóncava.
$\beta = 2$	Distribución Rayleigh.
$\beta > 2$	Tasa de falla creciente, convexa.
$3 \leq \beta \leq 4$	Tasa de falla creciente se aproxima a la distribución normal; simétrica.

(Mora, 2009).

<sup>12</sup> Distribución de Weibull lleva el nombre de su creador el Dr. Waloddi Weibull.

1.4.3.2 Distribución *Log-normal*. La distribución *LogNormal* de la función de tasa de fallas puede tomar varias formas, una de ellas es decreciente, con tendencia hacia su derecha, muy semejante a la fase de mortalidad infantil de la curva de Davies donde los valores de *Beta* están entre 0,00 y 0,95. Otra forma es creciente y cóncava como se observa en la fase donde *Beta* esta entre 1,05 y 1,95. Es útil como segunda opción después de que *Weibull* no cumpla con la bondad de ajuste en los rangos del factor de forma beta descrito.

Para el rango de *Beta* de 0,95 y 1,05 con tasa de fallas constante se recomienda usar *LogNormal* o *Gamma*, debido a que *Weibull* en este rango no trabaja muy bien.

1.4.3.3 Distribución normal. Es una distribución que se presenta con frecuencia cuando el desgaste comienza a afectar la vida útil del componente, la distribución normal conocida también como de *Gauss* trabaja en los rangos de  $-\infty$  a  $+\infty$ ; para trabajar con vida útil debe truncarse para trabajar solo desde el rango de 0 a  $+\infty$  porque la vida de un componente no puede tener valores negativos.

Los expertos recomiendan usar la estimación de parámetros mediante la distribución normal, cuando la distribución de Weibull no supera la prueba de bondad de ajuste y el valor estimado de no confiabilidad de *beta* sea superior a 2,05.

1.4.3.4 Distribución *exponencial*. Es una distribución que es un caso especial de la distribución *Gamma*. Es muy útil cuando el *beta* de *Weibull* alcanza un valor de  $1 \pm 0.05$  y la tasa de fallas es constante, su importancia está en que casi todos los componentes tienen durante su operación normal una intensidad de falla constante (Mora, 2009). Se utiliza también para modelar tiempo de vida de componentes electrónicos.

Los expertos recomiendan usar la distribución *Gamma* o *LogNormal* cuando *beta* de *Weibull* este entre 0,95 y 1,05 en remplazo de la distribución exponencial, por ser las anteriores más fáciles de manejar (Mora, 2009).



Etapa uno de la fase tres, en esta etapa la tasa de fallas empieza a crecer en forma suave, las fallas son reconocidas y empiezan a usarse las acciones preventivas es una etapa en que la ingeniería de confiabilidad inicia a ejercer dominio sobre el sistema y el control de sus fallos (Mora, 2009).

Etapa dos de la fase tres, en esta etapa la tasa de fallas empieza a crecer de forma constante, es en esta etapa donde las acciones preventivas pasan a ser acciones predictivas, el comportamiento de las fallas comienza a ser predecible (Mora, 2009).

Etapa tres de la fase tres, es la zona de envejecimiento donde la vida útil del equipo se acelera y la tasa de fallos se incrementa de forma rápida, en esta etapa se usan las acciones correctivas y modificativas; cuando la mantenibilidad no mejora se usa como última alternativa la sustitución o la reposición (Mora, 2009).

## 1.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

- Los parámetros *CMD* se establecen a partir del análisis de los datos del perfil funcional de un sistema o un equipo. Los datos se agrupan, se alinean para buscar los factores de forma y escala donde se determina una distribución que representa la evolución de la función de falla para ubicar la fase de la curva de *Davies* donde el equipo o sistema se encuentra; aplicar los pronósticos y generar las acciones de mantenimiento respectivas de acuerdo al nivel de mantenimiento que la compañía posea.

## 2 DESCRIPCIÓN DE LITRAC

### 2.1 OBJETIVO

Describir la situación actual de los niveles Operacional, Táctico y Estratégico del mantenimiento en *LITRAC*.

### 2.2 INTRODUCCIÓN

La planta de *CMSA* tiene una línea de trituración y apilamiento *LITRAC* en operación desde hace treinta y un (31) años. El trabajo de producción es por baches, cada bache es una superpila de mineral de níquel. La planta es una estructura en serie de sistemas de alimentación, trituración, muestreo y apilamiento de mineral a granel.

Ilustración 9. Serie del sistema de trituración y apilamiento *LITRAC*.



El nivel instrumental de la organización de mantenimiento de planta de CMSA se define como una fortaleza. La unidad de Mantenimiento Planta trabaja el triángulo de planeación, ejecución y análisis & mejoramiento, para asegurar el control de la gestión total a través del ciclo de mejoramiento continuo. Los demás niveles del mantenimiento se referencian en las siguientes secciones del trabajo.

Ilustración 10. Inventario de elementos nivel instrumental.

<b>TIPOS DE NIVELES INSTRUMENTALES DE LITRAC</b>			
<b>Nivel Básico</b>	<b>Nivel genérico</b>	<b>Nivel específico</b>	<b>Nivel específico técnico.</b>
Capital	Total Quality Control (TQC)	Análisis de falla.	Ultrasonido.
Recursos Humanos	Total Quality Management (TQM)	Costos	Inspección visual, acústica y al tacto de componentes
Planeación	Las 5 "S"	RCFA	Control de corrosión.
Recursos Naturales	Análisis y diagramas de Pareto	Gestión y manejo de inventarios	Lubricación, engrase y análisis de aceites.
Tecnología	Diagramas Causa Efecto	Valoración cualitativa del riesgo	Termografía infrarroja
Repuestos e insumos	Graficas de control	FMECA-RPN	Monitoreo de causas y efectos eléctricos
Espacio físico	Mejoramiento Continuo	Subcontratación	Análisis de vibraciones.
Sistema de información.	Herramientas estadísticas.	Métodos de diagnóstico rápido y confiable en mantenimiento (Auditorias)	Técnicas de control y monitoreo de condición de estado, Líquidos penetrantes.

La organización de mantenimiento consolida la estrategia a través de la información en tiempo real, en un sistema integral *EAM*<sup>13</sup> que soporta todas las actividades financieras, recursos humanos, administración del trabajo (*Work Management*), integración de la producción y compras de la compañía.

## 2.3 CARACTERÍSTICAS DE *LITRAC*

### 2.3.1 Descripción de *LITRAC* en nivel II de mantenimiento.

El segundo nivel de mantenimiento en el enfoque sistémico kantiano es el nivel operacional. Aquí se desarrollan las acciones mentales que el ser humano plantea realizarle a la maquinaria antes o después de una falla real o potencial. Las acciones que no hacen parte de un plan pueden ser correctivas y modificativas; las acciones que hacen parte de un plan pueden ser preventivas y predictivas (Mora, 2009).

2.3.1.1 Acciones correctivas. Las acciones correctivas están en diferentes proporciones en los diferentes bloques de la serie. Se estudia el comportamiento de las acciones correctivas durante el periodo comprendido entre el 1 de julio del 2010 y el 27 de enero del 2014.

Se toman seis rangos de duración; cuatro de corta duración que van de cero [0] horas hasta ocho [8] horas; uno intermedio desde ocho [8] horas hasta veinte [20] horas y dos de rango mayor desde veinte [20] horas a cincuenta [50] horas y otro de cincuenta [50] horas a ciento veinte [120] horas.

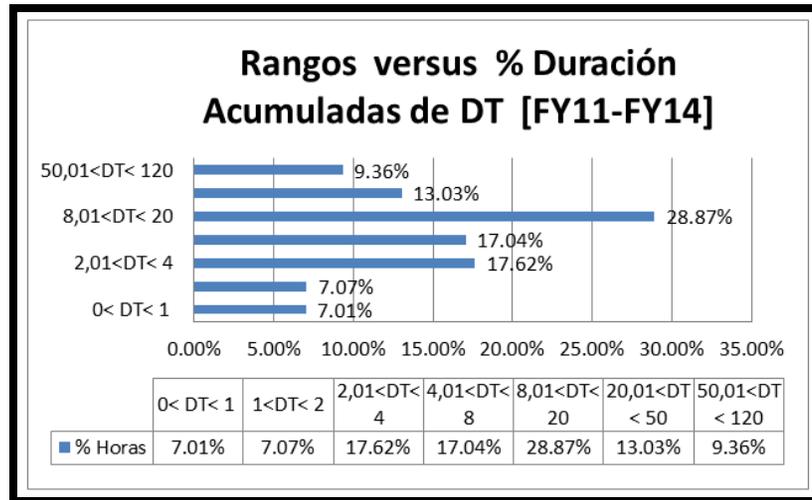
Las acciones correctivas de corto plazo entre cero y ocho horas ocupan el cuarenta y ocho [48.74] por ciento, entre ocho y veinte horas ocupan el veintiocho [28.87] por ciento, entre veinte horas y cincuenta horas se obtienen trece [13.07] por ciento y mayores a cincuenta horas es nueve [9] por ciento del tiempo total de reparación empleado en restaurar la operatividad de la línea *LITRAC*.

Este resultado del tiempo empleado en restaurar la línea a su operatividad nos indica que un cincuenta y un por ciento [51] del tiempo total fueron acciones correctivas con demoras mayores a veinte horas, lo que indica que la intervención fue de una complejidad mayor.

---

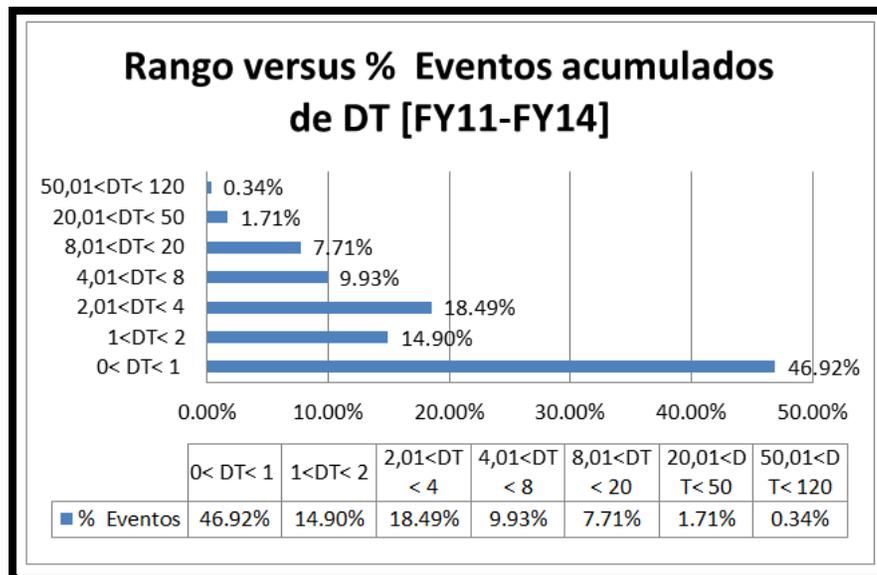
<sup>13</sup> *EAM Enterprise Asset Management.*

Ilustración 11. Rangos de duración DT versus % horas acumuladas.



El porcentaje de acciones correctivas en el periodo que se estudia se desarrolla de la siguiente manera: las acciones correctivas (Eventos) entre cero y una hora son el cuarenta y siete por ciento [46.92] del total de eventos, estas acciones son acciones de recuperación rápidas, generalmente son fallas eléctricas que pueden estar relacionadas con la actuación de los equipos de protección que son actuados como seguridad pero donde no existe una evidencia de una sobrecarga del sistema.

Ilustración 12. Rangos de duración DT versus % de eventos acumulados.



Las acciones correctivas entre una y cuatro horas corresponden al treinta y tres [33.39] por ciento, estas actividades son generalmente de cualquier tipo de actividad, mecánica, eléctrica o de instrumentación y control, este tiempo es empleado por el personal de mantenimiento para restaurar la operatividad de la línea, la complejidad de estas reparaciones no es alta.

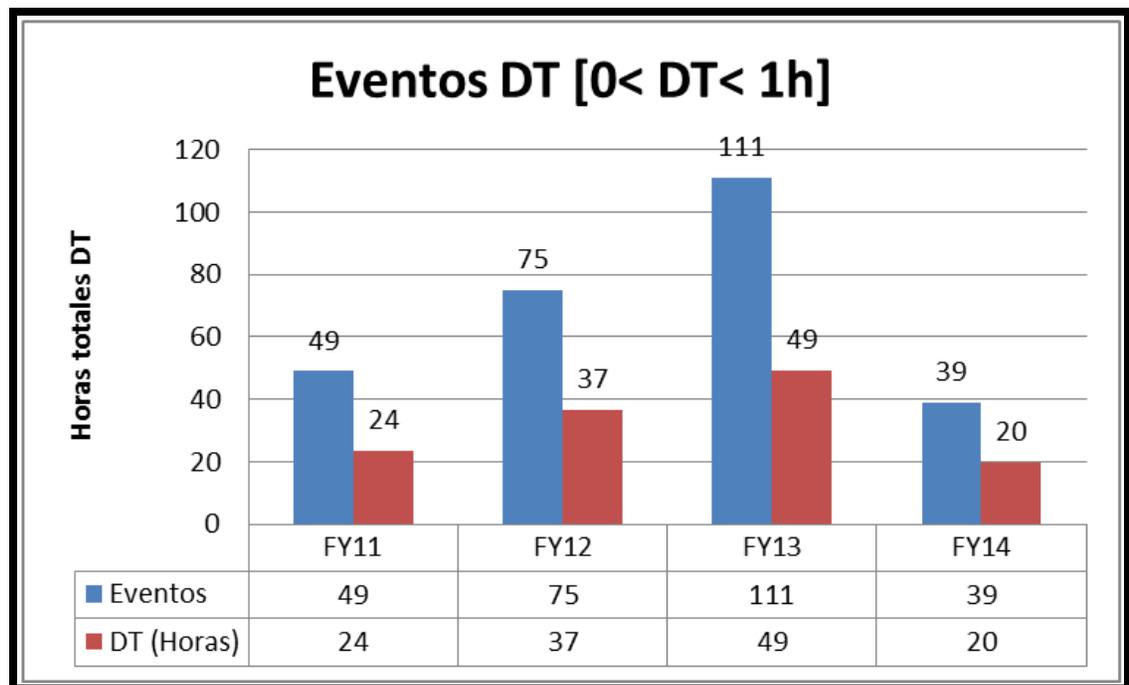
Las acciones en el rango de cuatro hasta ocho horas son aproximadamente el diez [9.92] por ciento del total, tienen generalmente mediana complejidad para las actividades de instrumentación y control, van asociadas a una débil búsqueda de problemas.

Las acciones entre ocho y veinte horas están cerca del ocho [8] por ciento y se representan por lo general en actividades de mantenimiento correctivo mecánico de mediana complejidad en el área de trituración y alimentación a granel.

Las acciones entre veinte y cincuenta horas están cerca del dos [2] por ciento del total y dentro de este grupo el ochenta [80] por ciento son actividades correctivas mecánicas en diferentes equipos de la línea, solo el veinte por ciento corresponde a las actividades correctivas eléctricas e instrumentación y control.

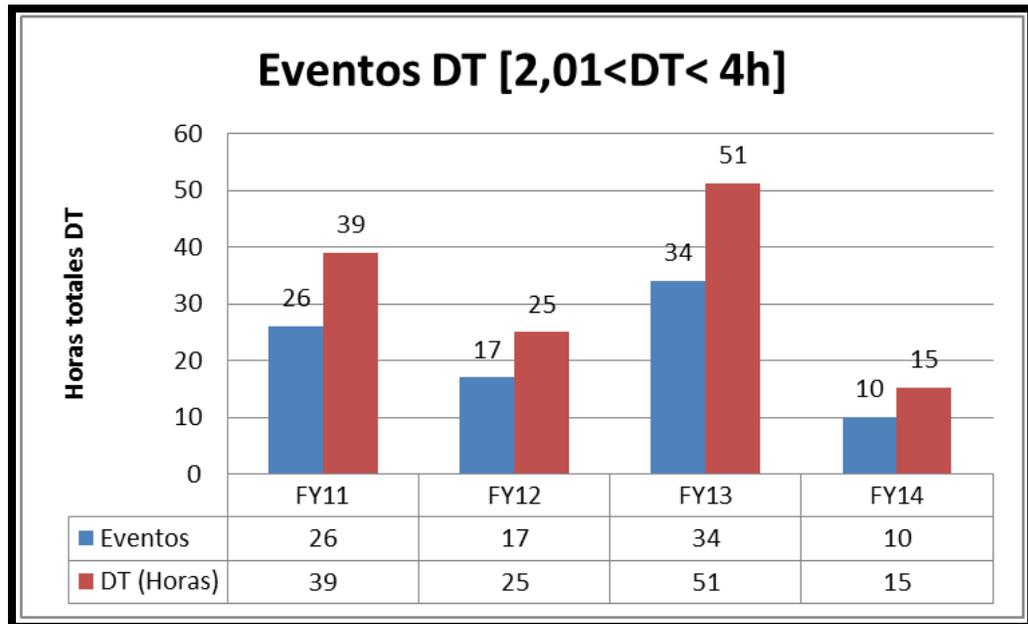
Desde el punto de vista de cómo se reparten estos tiempos en los diferentes años financieros podemos observar para el rango de cero a una hora como el número de eventos se ha disminuido al igual que la duración teniendo en cuenta que el FY14 tenía siete meses de trabajo.

Ilustración 13. Eventos DT rango  $[0 < DT < 1h]$ .



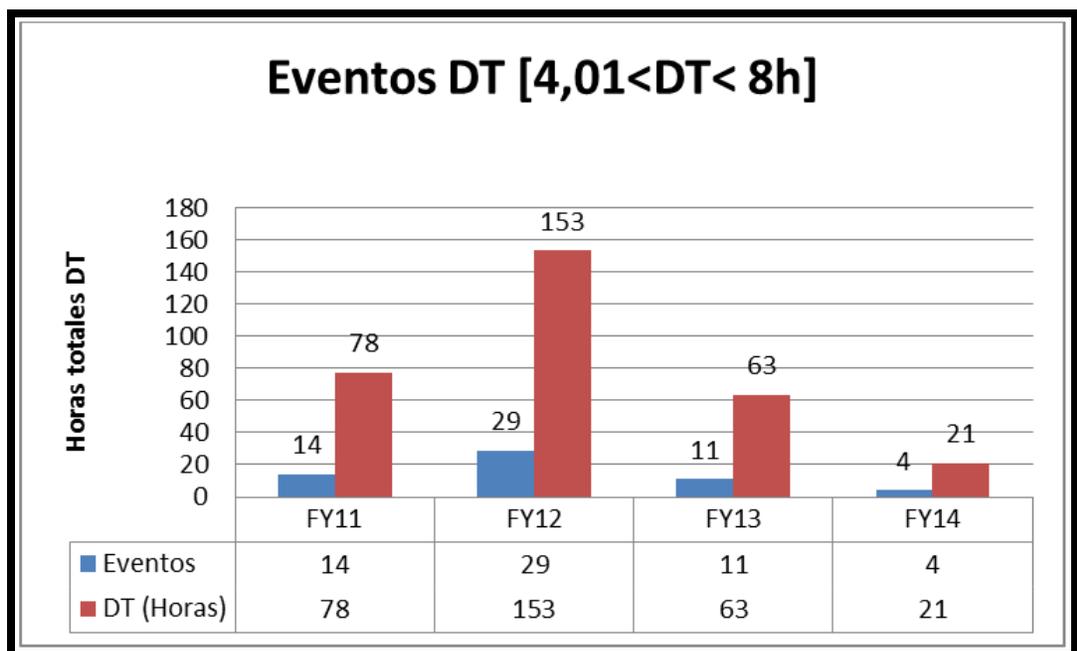
Para el rango de dos a cuatro horas, también se observa una disminución del número de eventos.

Ilustración 14. Eventos DT rango [2,01 < DT < 4h].



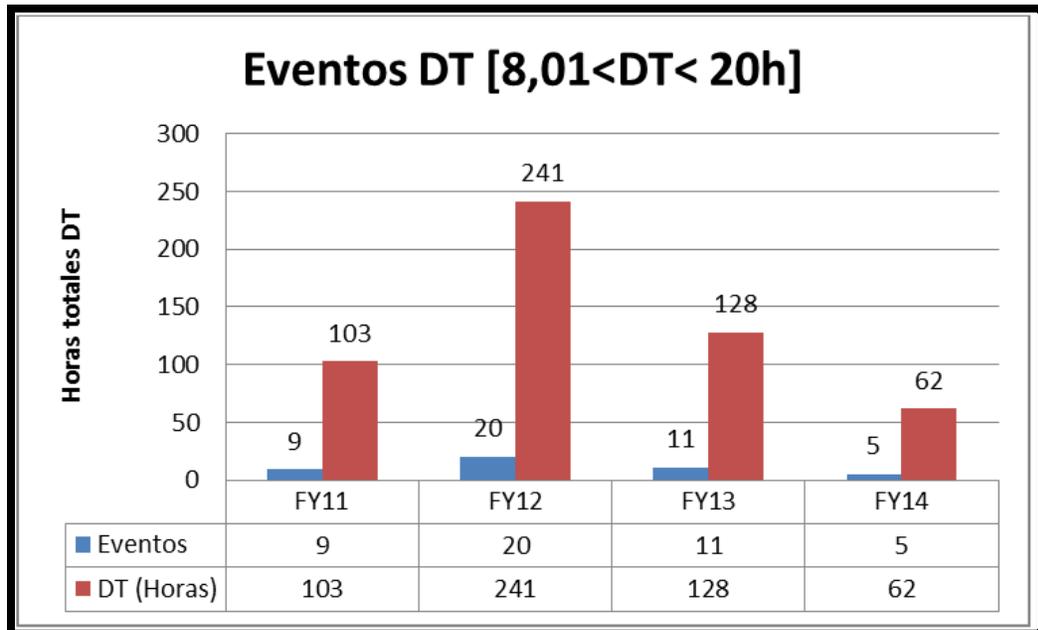
Para el rango de cuatro a ocho horas también se ve la reducción de los eventos en el tiempo.

Ilustración 15. Eventos DT rango [4,01 < DT < 8h].



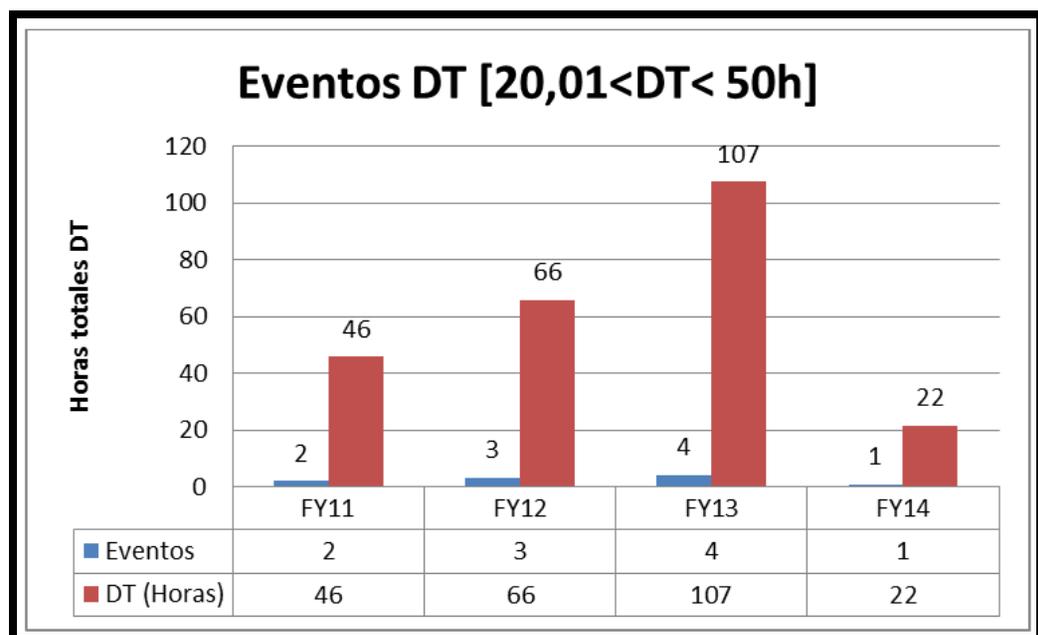
En el rango de ocho a veinte horas la disminución del número de eventos por año financiero está en disminución.

Ilustración 16. Eventos DT rango [8,01 < DT < 20h].



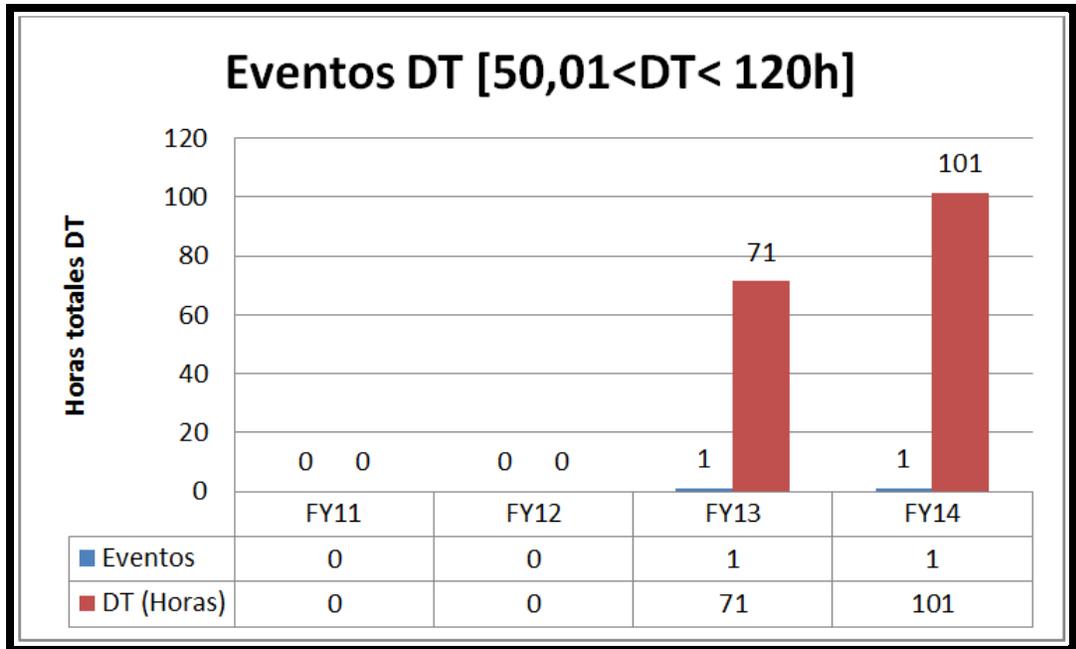
En el rango de veinte a cincuenta horas ha venido creciendo con una disminución en el año financiero catorce, pero este año aún no termina.

Ilustración 17. Eventos DT rango [20,1 < DT < 50h].



En el rango de cincuenta horas y más la tendencia es creciente en el tiempo empleado para restaurar la función de la máquina. Esto indica que la complejidad de la reparación aumento.

Ilustración 18. Eventos DT rango [50,1 < DT < 120 h].



Las acciones correctivas de emergencia son en algunas ocasiones acciones de desvare, en LITRAC durante el FY13, se reportan dos actividades tipo PM03<sup>14</sup>, como actividades tipo desvare, una en el sistema de alimentación de CR102<sup>15</sup>, en el equipo CV01<sup>16</sup> con una duración de setenta y un horas, una recurrencia de esta misma acción con treinta y tres horas pocas semanas después.

En otras ocasiones estas acciones correctivas son cambios totales de partes como el caso del trabajo durante el FY14 en el FE01 donde la recuperación de la operatividad tuvo una duración de ciento una horas [101] como resultado del daño de las bandejas donde hacer una operación de desvare no garantizaba una confiabilidad del trabajo, esto genero un cambio total del tendido de bandejas realizando un overhault al equipo para darle una confiabilidad mayor.

<sup>14</sup> PM03 Es una actividad de mantenimiento correctivo de emergencia.

<sup>15</sup> CR102 Es una trituradora secundaria de la línea LITRAC.

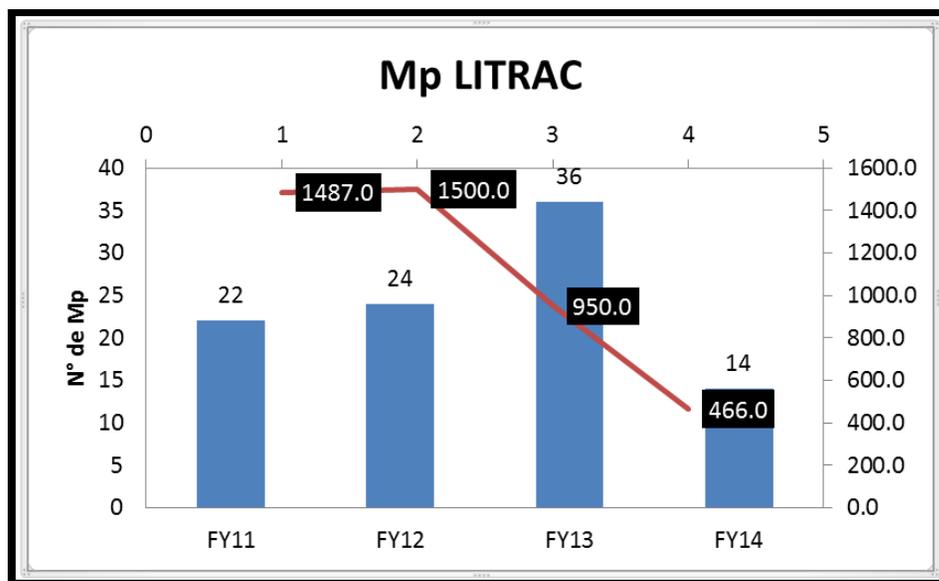
<sup>16</sup> CV01 Es la banda transportadora de alimentación de la CR102.

2.3.1.2 Acciones bajo un plan. Las acciones mentales que corresponden al nivel operativo en LITRAC se representan en dos tipos de acciones bajo un plan: las correspondientes al plan que lanza el EAM, de forma secuencial de acuerdo al plan de inspecciones preventivas que llevan el nombre de PM02<sup>17</sup> y las correspondientes al tipo PM01<sup>18</sup> que son actividades de mantenimiento correctivo planeadas.

En la reunión semanal de planeación se divulga el programa para la siguiente semana, es aquí donde Mantenimiento y Producción acuerdan las fechas, tareas a programar de acuerdo a los tiempos disponibles para la atención de la maquinaria productiva con base en los objetivos de la producción.

El tiempo de aplicación para el mantenimiento preventivo, predictivo y planeado, correspondientes a acciones bajo un plan muestran una tendencia de reducción a través de los diferentes años financieros.

Ilustración 19. Mantenimiento Preventivo en LITRAC.



La duración de la aplicación en horas de los diferentes tipos de mantenimientos preventivos se revisa desde la escogencia de unos rangos de duración.

Generalmente los mantenimientos preventivos con duración entre cero y menor a cuatro [4] horas son mantenimientos predictivos planeados que ocurren fuera de

<sup>17</sup> PM02 Es una actividad de mantenimiento planeado preventivo que sale del plan de mantenimiento.

<sup>18</sup> PM01 Es una actividad de mantenimiento planeado correctivo que sale de un aviso de corrección de un PM02 o una reparación correcta y definitiva.

una ventana de mantenimiento. Una ventana de mantenimiento es el tiempo determinado en la reunión de planeación donde Mantenimiento y Producción determinan fecha, hora de inicio y terminación de las actividades de mantenimiento bajo un plan donde se acuerdan los trabajos a ejecutar en la línea de producción.

Ilustración 20. Rangos de duración Mp en LITRAC.

MANTENIMIENTOS PREVENTIVOS (Mp) EN LITRAC								
Año	Rango en horas	0 < M < 4	4 < M < 16	16 < M < 48	48 < M < 62	62 < M < 76	M > 76	Totales
FY11	Mp	0	0	1	11	5	5	22
	Total (Horas)	0.0	0.0	36.0	658.0	343.0	450.0	1487.0
FY12	Mp	1	0	4	6	5	8	24
	Total (Horas)	0.4	0.0	152.0	330.0	340.0	690.0	1512.4
FY13	Mp	9	7	15	2	2	1	36
	Total (Horas)	8.0	76.0	520.0	114.0	130.0	101.0	949.0
FY14	Mp	1	3	6	4	0	0	14
	Total (Horas)	0.5	36.0	206.0	224.0	0.0	0.0	466.5

La duración de la ventana de mantenimiento se observa en la ilustración 20 como disminuye a través de los años, anteriormente las ventanas de mantenimiento con una duración de dieciséis horas no existían; ahora los hay con más frecuencia. Los mantenimientos de larga duración mayores a setenta y seis horas ya no volvieron a aparecer, con esto vemos como la preocupación del grupo de mantenimiento para mejorar sus prácticas y sus métodos se hace palpable con la realidad de hoy tal y como se planteó en los antecedentes de este trabajo.

El plan de mantenimiento planeado que contiene las hojas de ruta y actividades PM02 están en el ERP y son generadas automáticamente, para el FY13 se tiene un resumen de cuantas horas están destinadas para cada sistema que conforma la serie de LITRAC. En las acciones planeadas también tenemos mantenimientos correctivos o modificativos planeados estos están definidos como PM01y vemos para el FY13 una distribución de horas por cada sistema que conforma la serie.

Ilustración 21. Horas de *PM02* de *LITRAC*.

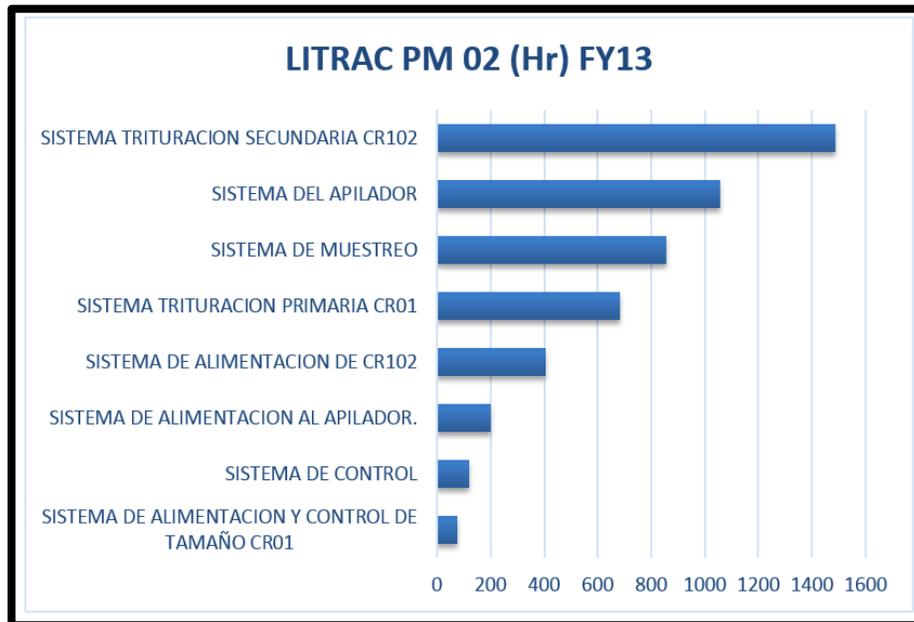
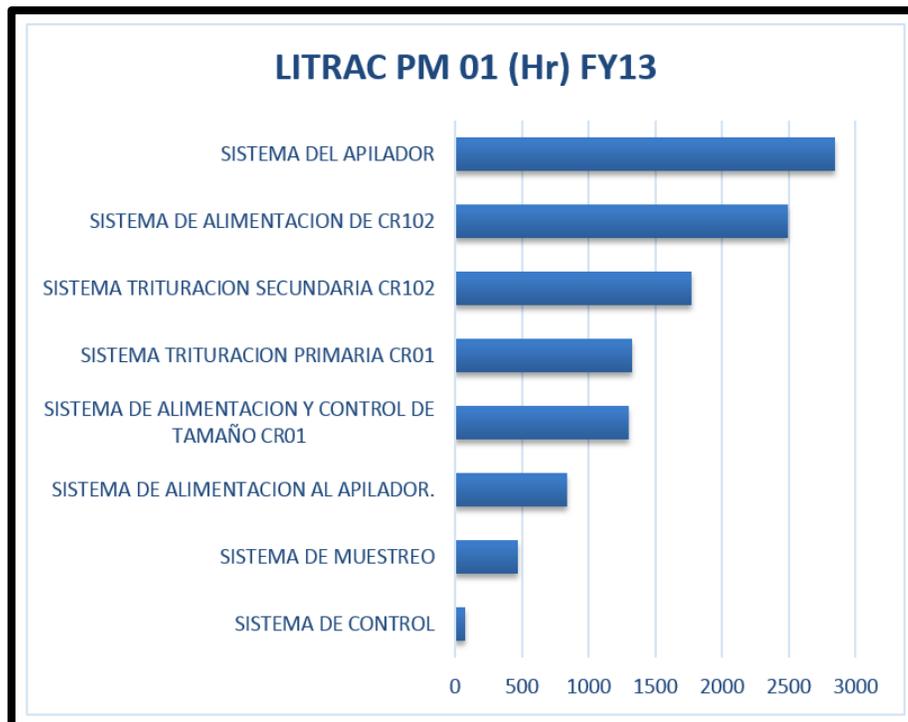


Ilustración 22. Horas de *PM01* de *LITRAC*.



### 2.3.2 Descripción de *LITRAC* en nivel III de mantenimiento.

El nivel táctico es el tercero del enfoque sistémico kantiano, es de orden real, trabaja en el mediano plazo. Alcanzar este nivel requiere dominar de forma concreta los instrumentos básicos, avanzados genéricos y específicos del mantenimiento en el nivel instrumental y entender las acciones que se generan en el nivel operacional.

La unidad de mantenimiento de planta de *CMSA* trabaja en el esquema de un triángulo equilátero; cada vértice y su lado tienen el mismo valor para la organización. Los tres vértices son: Planeación del mantenimiento; Ejecución del mantenimiento y Análisis & Mejoramiento del mantenimiento. *CMSA* tiene un enfoque táctico propio, posee reglas, normas que aplica a la administración del mantenimiento.

Este nivel enfoca la forma como cada compañía organiza la ejecución y administración de su mantenimiento.

Existen mundialmente varias tácticas conocidas: *T.P.M.*<sup>19</sup>; *R.C.M.*<sup>20</sup>; *T.P.M* y *R.C.M. combinados*; *P.M.O.*<sup>21</sup>; *proactiva*; *reactiva*; *clase mundial*; *por objetivos y la propia* que la empresa ha determinado aplicar (Mora, 2009).

De la misma manera que en el nivel dos, las diferentes tácticas no son ni buenas, ni malas, por sí mismas, estas son exitosas si cumplen las metas dispuestas por la compañía de acuerdo con la visión y misión, con rangos atractivos de *CMD*, bajos costos *LCC*<sup>22</sup> y un grado de desarrollo (Smith, 1983).

La táctica en *LITRAC* no es una sola, la aplicación es de acuerdo al tipo de acciones que ocurren, si son repetitivas, críticas o con alto impacto, usar la metodología del *RCA*<sup>23</sup> para encontrar la raíz de los problemas repetitivos y definir las acciones necesarias para eliminar su recurrencia, usar *R.C.M.* cuando la criticidad de las consecuencias de fallo son mucho mayores que afecten a la seguridad, al medio ambiente y a la producción.

Dentro del círculo de mejoramiento continuo el análisis sistemático de la cantidad de órdenes no llevadas a cabo de *PM02* en un equipo o sistema; determina la aplicación del método de *P.M.O.* a los planes de mantenimiento existentes de tales equipos para definir si el equipo requiere cambio en las frecuencias del plan

---

<sup>19</sup> *T.P.M. Total Productive Maintenance.*

<sup>20</sup> *R.C.M. Reliability centred Maintenance.*

<sup>21</sup> *P.M.O. Preventive Maintenance Optimization.*

<sup>22</sup> *L.C.C. Life Cycle Cost.*

<sup>23</sup> *RCA Root Cause Analysis.*

actual, cambio de tareas u otros cambios con el objetivo de preservar el activo en óptimo funcionamiento.

### 2.3.3 Descripción de *LITRAC* en nivel IV de mantenimiento.

Bajo el enfoque del sistema kantiano el cuarto nivel del mantenimiento es donde se mide el grado de éxito de lo que se realiza en los tres niveles anteriores. Se usan índices de aceptación de tipo mundial, que usan metodologías de validez universal que ratifican el éxito o el fracaso de la gestión y la operación integral del mantenimiento de una compañía.

*CMSA* realiza una evaluación del grado de éxito de la gestión de mantenimiento por cada área de trabajo donde se realiza el control de la aplicación de la mano de obra sobre el trabajo que debe realizar, el día que se debe realizar y el tiempo que demora para realizar lo planeado; se evalúa la adherencia al plan que se programa diariamente. Si el grupo de planeación planea lo que el *EAM* envía, el grupo de ejecución realiza lo que se acordó en el plan y fecha correctos, el grupo de análisis y mejoramiento apoya la gestión realizando el aseguramiento de esos planes, repuestos y entrenamientos para que la gestión no tenga inconvenientes y las disponibilidades de los equipos críticos de proceso no se disminuyan.

## 2.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

- En el nivel operacional las acciones correctivas con mayor tiempo de reparación han venido en aumento en los dos últimos años financieros evidenciando una disminución de la disponibilidad de *LITRAC*.
- El tiempo disponible para llevar a cabo una ventana de mantenimiento viene en disminución en los últimos años financieros, esto apoya la preocupación del grupo de mantenimiento indicada en el capítulo cero punto dos antecedentes de este trabajo.
- En el nivel de táctico los resultados de disminución de eventos DT en los últimos años financieros reflejan los resultados de las tácticas de RCA aplicadas en los años anteriores.

### 3.1 OBJETIVO

Esbozar los valores *CMD* actuales y futuros, mediante su valoración con los métodos: puntual, de distribución y pronósticos con Disponibilidad Alcanzada en *LITRAC*.

### 3.2 INTRODUCCIÓN

El análisis se realiza con un proceso sistemático que se llama modelo universal e integral propuesto para la medición de *CMD* y que se indica en la ilustración 4. Se siguen los seis pasos indicados en el capítulo 1.4.1.

Al seguir los pasos indicados, primero se organizan los datos que tenemos desde julio de 2010 hasta enero 2014, en un segundo paso se hace la escogencia del tipo de disponibilidad, se definió en los primeros capítulos aplicar el cálculo de la Disponibilidad Alcanzada, en la cual se requieren los tiempos de  $MTBM_C$   $MTBM_P$   $MTTR$  y  $M_P$ , para posteriormente hallar los valores de *MTBM* (*Mean Time Between Maintenance* - Medida de Confiabilidad) y  $\bar{M}$  tiempo medio de mantenimiento activo (Medida proporcional de Mantenibilidad).

La primera parte consiste en obtener los valores presentes de Disponibilidad Alcanzada, estos valores los calculamos de dos maneras: la primera mediante el cálculo puntual o método de promedios que es muy inexacto cuando se tienen pocos datos (Que es nuestro caso para las variables  $M_p$  y  $MTBM_p$ ) y una segunda manera es a través del Método Internacional de Distribuciones el cual utiliza primero la función de Weibull y en el evento de su Bondad de ajuste no cumpla se procede entonces a validar por las otras distribuciones.

El cálculo de la Disponibilidad Alcanzada se realiza con la aplicación de las ecuaciones 5, 6 y 7 del capítulo 1.3.3 Disponibilidades donde se expresan las formulas de la Disponibilidad Alcanzada; el tiempo medio entre mantenimientos *MTBM* y el tiempo medio de mantenimiento activo  $\bar{M}$ .

La segunda parte, consiste en obtener los valores futuros de dos maneras: la primera con el Método Internacional de Distribuciones indicado en la primera parte y la segunda manera usando pronósticos con series temporales. En los cálculos con Distribuciones usamos los paquetes informáticos Valramor y Weibull.

### 3.3 ANÁLISIS CMD EN LITRAC

El análisis parte desde el primer paso: la obtención de los datos de funcionamiento y paro de la línea de producción. Los datos TTR y Mp son claramente identificados, para el cálculo de los datos MTBMc y MTBMp se debe especificar claramente los tiempos donde el equipo se encuentra disponible así no esté produciendo, estos tiempos de demora no entran en nuestro cálculo para la Disponibilidad Alcanzada, la base de datos se encuentra en el Anexo A.

Para lograr un mayor número de datos, que genere resultados más confiables se utilizara mes acumulado para hacer los cálculos, iniciando con el mes de julio 2010 e ir adicionando al mes de agosto 2010 los datos del mes inmediatamente anterior, y de esta forma sucesivamente cada mes evaluado hasta llegar al mes de enero 2014 para obtener cuarenta y tres periodos de datos.

#### 3.3.1 Análisis con el método puntual.

El método puntual usa los promedios, es inexacto para pequeños grupos de valores, lo vamos a usar en este trabajo para comparar las disponibilidades y poder demostrar que su uso puede indicarnos una falsa información cuando otros métodos universalmente probados entregan resultados que se ajustan más a la realidad. Los cálculos los pueden encontrar en Anexo B; hoja de cálculo de nombre "Resultados". El resultado final para el mes de enero 2014 se ve en la ilustración 23.

Ilustración 23. Variables por el método puntual.

METODO PUNTUAL							
Promedio	32.62	3.16	196.74	46.00	27.98	9.26	0.751
Variables	MTBMc	MTTR	MTBMp	Mp	MTBM	$\bar{M}$	Da

#### 3.3.2 Análisis con el método distribuciones.

Para iniciar el proceso de cálculo con distribuciones a través de los paquetes informáticos se requiere tener los datos obtenidos en los primeros pasos del

proceso, es decir los datos individuales de TTR; TBMc; M y TBMp; estos datos están resumidos en el Anexo B.

Se toman todos los tiempos acumulados de cada mes, por ejemplo para los cálculos de lo No Planeado, que son el MTBMc y el MTTR, del mes de julio de 2010, se toman los datos correspondientes, en cada caso se trabaja con parámetros de no Confiabilidad y de mantenibilidad, con los métodos i-kaésimo y Benard de aproximación de Rango de Medianas. Se realiza alineación para Weibull a través de los paquetes informáticos para obtener las variables MTTR; MTBMc; Mp y MTBMp.

Ilustración 24. Datos de referencia mes de julio 2010.

jul-10			
TBMc	TTR	TBMp	M
31.93	0.70	101.15	70.37
44.87	8.65	166.88	60.00
52.38	0.88	147.23	
0.42	1.75		
49.37	0.28		
20.83	1.17		
68.23	10.58		
6.35	0.40		
4.03	0.17		
13.58	0.58		
38.52	0.22		
21.93	1.23		
53.55	1.35		
9.27			

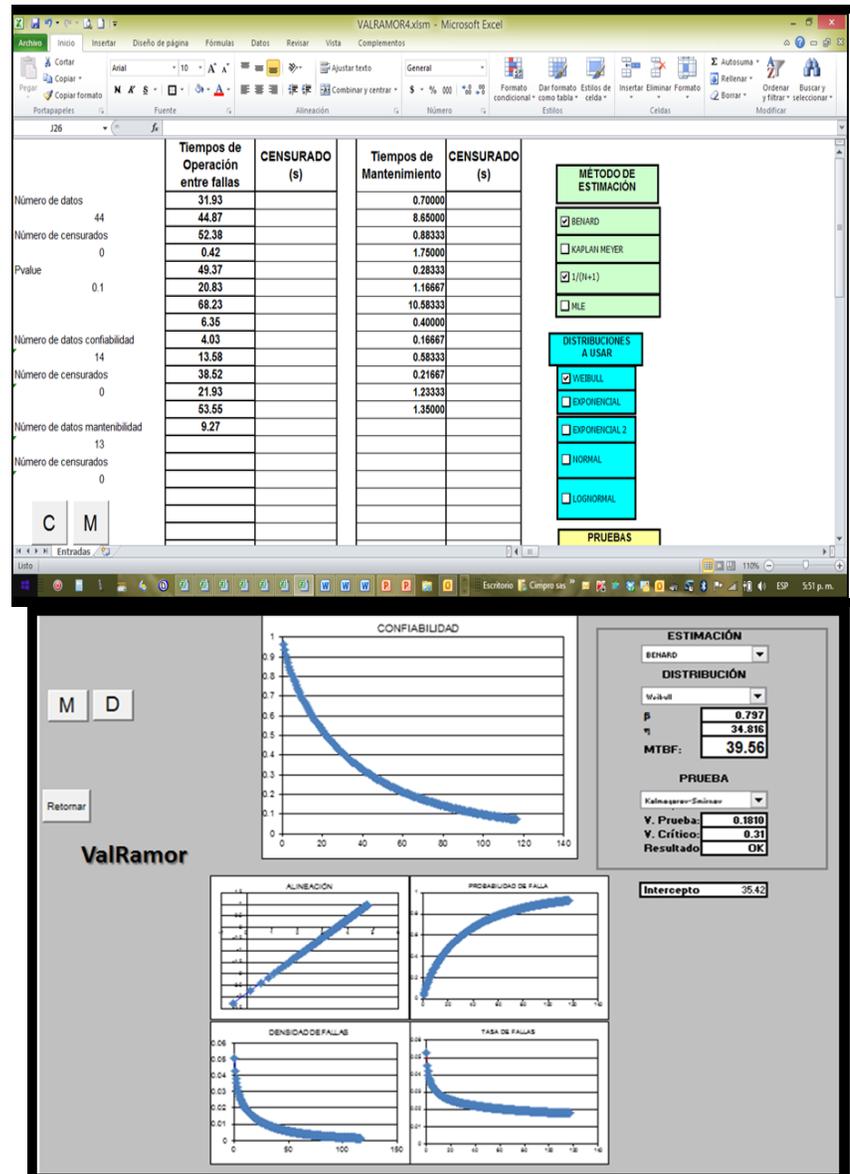
Los datos de cada mes y sus acumulados se usan como datos de entrada con los paquetes informáticos para conseguir los parámetros de forma y de escala que definen la distribución que mejor se ajusta estadísticamente a los datos que se analizan.

Se usan dos paquetes informáticos para calcular las variables de las distribuciones Weibull, uno de ellos VALRAMOR4 y otro WEIBULL ++ Versión 6. Estos paquetes entregan la información de las variables, además de sus factores de forma y de escala con los que podemos entrar a evaluar los resultados y realizar los análisis.

Se realizan cálculos con los dos programas para evaluar sus diferencias y poder escoger el programa más versátil para hacer los cálculos que involucran un número de datos mayor. Se hace la comparación usando el mes de julio del 2010.

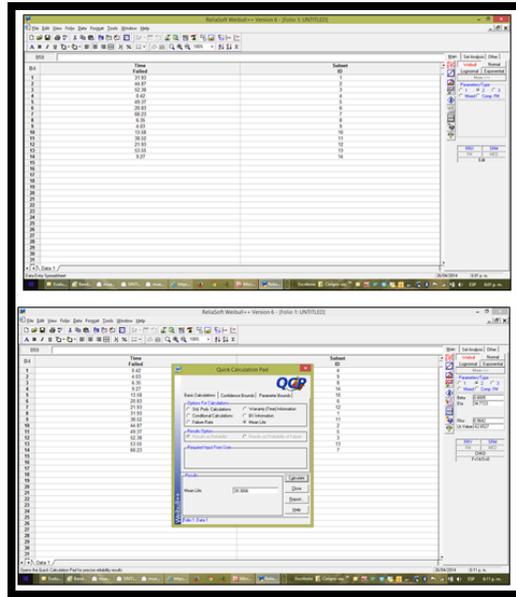
Se realiza una comparación de los datos de ambos paquetes informáticos y la diferencia de resultados entre ambos dan por debajo del 0.5% por lo que decidimos asumir a VALRAMOR4 (Ver Anexo E) como programa final por mayor versatilidad, debido a que entrega los valores de las pruebas de bondad de ajuste que rigen el grupo de datos que se ingresan; el cuadro comparativo se puede observar en la ilustración 27.

Ilustración 25. Paquete informático VALRAMOR4.



El paquete informático VALRAMOR4 es propiedad intelectual del ingeniero PHD Alberto Mora Gutierrez, director de este proyecto.

Ilustración 26. Paquete informático WEIBULL ++Versión 6.



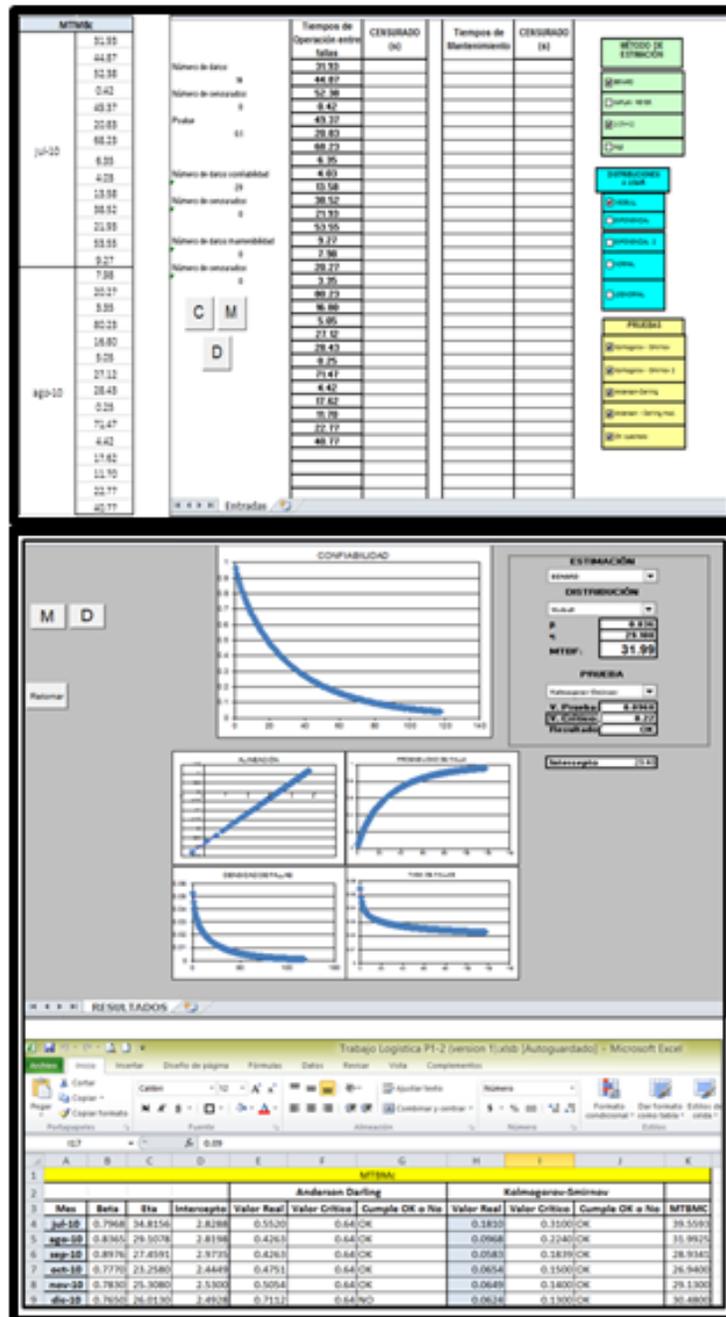
Paquete WEIBULL ++ Versión 6 de Reliasoft licencia de la Universidad EAFIT Medellín –Colombia.

Ilustración 27. Comparación de resultados de ambos paquetes informáticos.

	Weibull	ValRamor	Diferencias
<b>Beta</b>	<b>0.7970</b>	<b>0.8005</b>	<b>-0.44%</b>
<b>Eta</b>	<b>34.8160</b>	<b>34.7723</b>	<b>0.13%</b>
<b>Rho</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.00%</b>
<b>MTBM<sub>C</sub></b>	<b>39.5600</b>	<b>39.3806</b>	<b>0.45%</b>
<b>Todas las diferencias dan por debajo del 0.5%, lo que las hace técnicamente iguales, por lo cual se asume ValRamor como programa Final, por su versatilidad</b>			

Una vez se obtiene el primer período, para el segundo se toman todos los valores individuales de los dos períodos y se obtienen nuevos cálculos, como se muestra en la siguiente figura; de esta misma manera se hacen los cálculos para las cuatro variables durante los cuarenta y tres periodos que se estudian.

Ilustración 28. Cálculo de dos o más meses de cada variable.



De esta manera, se realiza entonces el proceso global e individual de cada uno de los meses que se evalúan, se evaluaron cuarenta y tres periodos.

A continuación se presentan todos los cálculos y resultados, con muy buenas pruebas de Kolmogórov- Anderson – Darling – Smirnov, que cumplen bien. Ver Anexo C.

Ilustración 29. Resultados de MTBM<sub>C</sub>, de LITRAC.

Período	#	MTBMc									
					Anderson Darling			Kolmogorov-Smirnov			MTBMC
		Beta	Eta	Intercepto	Valor Real	Valor Crítico	Cumple OK o No	Valor Real	Valor Crítico	Cumple OK o No	
jul-10	1	0.7968	34.8156	2.8288	0.5520	0.64	OK	0.1810	0.3100	OK	39.5593
ago-10	2	0.8365	29.1078	2.8198	0.4263	0.64	OK	0.0968	0.2240	OK	31.9925
sep-10	3	0.8976	27.4591	2.9735	0.4263	0.64	OK	0.0583	0.1839	OK	28.9341
oct-10	4	0.7770	23.2580	2.4449	0.4751	0.64	OK	0.0654	0.1500	OK	26.9400
nov-10	5	0.7830	25.3080	2.5300	0.5054	0.64	OK	0.0649	0.1400	OK	29.1300
dic-10	6	0.7650	26.0130	2.4928	0.7112	0.64	NO	0.0624	0.1300	OK	30.4800
ene-11	7	0.7580	25.7920	2.4635	0.3012	0.64	OK	0.0473	0.1200	OK	30.4300
feb-11	8	0.7240	23.5260	2.2865	0.4028	0.64	OK	0.0599	0.1200	OK	28.8700
mar-11	9	0.7300	22.8700	2.2848	0.4877	0.64	OK	0.6440	0.1100	OK	27.8800
abr-11	10	0.7500	22.3520	2.3302	0.3769	0.64	OK	0.0570	0.1100	OK	26.6300
may-11	11	0.7550	21.3320	2.3105	0.3375	0.64	OK	0.0545	0.1000	OK	25.2500
jun-11	12	0.7670	21.4570	2.3517	0.2996	0.64	OK	0.0498	0.1000	OK	25.1000
jul-11	13	0.7770	18.3350	2.2601	0.2523	0.64	OK	0.0336	0.0900	OK	21.2200
ago-11	14	0.7620	17.8040	2.1941	0.3272	0.64	OK	0.0670	0.0900	OK	20.9300
sep-11	15	0.7430	16.6120	2.0879	0.3484	0.64	OK	0.0327	0.0800	OK	19.9300
oct-11	16	0.7630	16.5980	2.1435	0.2864	0.64	OK	0.0282	0.0800	OK	19.4800
nov-11	17	0.7660	16.6680	2.1551	0.3329	0.64	OK	0.0282	0.0700	OK	19.5000
dic-11	18	0.7730	16.8960	2.1853	0.3852	0.64	OK	0.2930	0.0700	OK	19.6400
ene-12	19	0.7790	17.1010	2.2117	0.4647	0.64	OK	0.0355	0.0700	OK	19.7600
feb-12	20	0.7810	17.4640	2.2338	0.3602	0.64	OK	0.0282	0.0700	OK	20.1400
mar-12	21	0.7730	17.8620	2.2283	0.3674	0.64	OK	0.0299	0.0700	OK	20.6700
abr-12	22	0.7720	17.9319	2.2284	0.3426	0.64	OK	0.0277	0.0672	OK	20.5876
may-12	23	0.7591	17.9137	2.1904	0.5055	0.64	OK	0.0310	0.0656	OK	21.1198
jun-12	24	0.7634	18.2869	2.2186	0.5698	0.64	OK	0.0325	0.0646	OK	21.4634
jul-12	25	0.7582	17.9064	2.1875	0.6225	0.64	OK	0.0308	0.0629	OK	21.1315
ago-12	26	0.7434	17.3731	2.1223	0.7199	0.64	NO	0.0329	0.0607	OK	20.8359
sep-12	27	0.7386	17.3667	2.1084	0.7374	0.64	NO	0.0329	0.0594	OK	20.9437
oct-12	28	0.7415	17.4747	2.1212	0.8523	0.64	NO	0.0360	0.0584	OK	21.0039
nov-12	29	0.7473	17.1418	2.1235	0.0879	0.64	NO	0.0356	0.0568	OK	20.4698
dic-12	30	0.7512	16.8953	2.1237	0.9317	0.64	NO	0.0362	0.0550	OK	20.0903
ene-13	31	0.7569	17.0955	2.1487	0.9208	0.64	NO	0.0368	0.5407	OK	20.2009
feb-13	32	0.7644	17.1399	2.1720	0.8797	0.64	NO	0.0334	0.0553	OK	20.0972
mar-13	33	0.7636	17.3926	2.1809	0.9576	0.64	NO	0.0367	0.0526	OK	20.4095
abr-13	34	0.7549	17.4299	2.1576	1.1662	0.64	NO	0.0405	0.0519	OK	20.6418
may-13	35	0.7446	17.4566	2.1293	1.2705	0.64	NO	0.0416	0.0511	OK	20.9101
jun-13	36	0.7484	17.4749	2.1410	1.2216	0.64	NO	0.0400	0.0501	OK	20.8442
jul-13	37	0.7454	17.4194	2.1300	1.1140	0.64	NO	0.0383	0.0493	OK	20.8452
ago-13	38	0.7430	17.3299	2.1194	1.1637	0.64	OK	0.0388	0.0485	OK	20.7950
sep-13	39	0.7456	17.4001	2.1298	1.1792	0.64	NO	0.0387	0.4785	OK	20.8182
oct-13	40	0.7494	17.5224	2.1459	1.1148	0.64	NO	0.0363	0.0474	OK	20.8776
nov-13	41	0.7470	17.7111	2.1470	1.1533	0.64	NO	0.0352	0.0469	OK	21.1574
dic-13	42	0.7530	16.9064	2.1293	0.9407	0.64	NO	0.0300	0.0453	OK	20.0632
ene-14	43	0.7543	16.9648	2.1355	0.9707	0.64	NO	0.0297	0.0447	OK	20.1046

Ilustración 30. Resultados de MTTR de LITRAC.

MTRR										
			Anderson Darling & JI2			Kolmogorov-Smirnov			Intercepto	MTRR
	Beta	Eta	Valor Real	Valor Crítico	Cumple OK o No	Valor Real	Valor Crítico	Cumple OK o No		
jul-10	0.78	2.03	0.458	0.63	OK	0.2040	0.34	OK	0.5523	1.95
ago-10	0.82	1.87	0.284	0.63	OK	0.0965	0.24	OK	0.5122	1.80
sep-10	0.73	2.53	0.482	0.63	OK	0.0981	0.21	OK	0.6820	2.57
oct-10	0.86	2.65	0.348	0.63	OK	0.0665	0.16	OK	0.8353	2.50
nov-10	0.87	2.58	0.360	0.63	OK	0.0817	0.15	OK	0.8286	2.44
dic-10	0.90	2.42	0.489	0.63	OK	0.0866	0.14	OK	0.7976	2.30
ene-11	0.92	2.44	0.518	0.63	OK	0.0871	0.13	OK	0.8206	2.32
feb-11	0.95	2.53	0.404	0.63	OK	0.0739	0.13	OK	0.8761	2.39
mar-11	0.95	2.43	0.447	0.63	OK	0.0742	0.12	OK	0.8425	2.32
abr-11	0.97	2.44	0.432	0.63	OK	0.0739	0.12	OK	0.8681	2.33
may-11	0.97	2.51	0.443	0.63	OK	0.0687	0.11	OK	0.8989	2.38
jun-11	0.98	2.56	0.404	0.63	OK	0.0636	0.11	OK	0.9246	2.44
jul-11	0.96	2.57	0.550	0.63	OK	0.0707	0.10	OK	0.9059	2.30
ago-11	0.95	2.44	0.525	0.10	NO	0.0670	0.10	OK	0.8460	2.21
sep-11	0.95	2.40	0.608	0.63	OK	0.0587	0.09	OK	0.8319	2.22
oct-11	0.94	2.39	0.312	0.10	NO	0.0614	0.09	OK	0.8243	2.22
nov-11	0.95	2.44	0.180	0.10	NO	0.0609	0.08	OK	0.8498	2.27
dic-11	0.95	2.45	0.119	0.10	NO	0.0650	0.08	OK	0.8506	2.28
ene-12	0.95	2.50	0.202	0.10	NO	0.0614	0.08	OK	0.8669	2.28
feb-12	0.93	2.61	0.035	0.10	OK	0.0614	0.08	OK	0.8975	2.41
mar-12	0.94	2.61	0.050	0.10	OK	0.0599	0.07	OK	0.9013	2.41
abr-12	0.94	2.56	0.011	0.10	OK	0.0612	0.07	OK	0.8850	2.38
may-12	0.93	2.74	0.005	0.10	OK	0.0620	0.07	OK	0.9377	2.55
jun-12	0.93	2.81	0.025	0.10	OK	0.0614	0.07	OK	0.9615	2.61
jul-12	0.94	2.73	0.026	0.10	OK	0.0573	0.07	OK	0.9420	2.55
ago-12	0.93	2.67	0.036	0.10	OK	0.0576	0.07	OK	0.9128	2.52
sep-12	0.93	2.66	0.025	0.10	OK	0.0553	0.06	OK	0.9099	2.51
oct-12	0.93	2.62	0.009	0.10	OK	0.0552	0.06	OK	0.8965	2.48
nov-12	0.91	2.49	0.003	0.10	OK	0.0551	0.06	OK	0.8324	2.39
dic-12	0.92	2.47	0.001	0.10	OK	0.0547	0.06	OK	0.8300	2.38
ene-13	0.91	2.49	0.001	0.10	OK	0.0535	0.06	OK	0.8297	2.41
feb-13	0.91	2.47	0.003	0.10	OK	0.0468	0.06	OK	0.8227	2.39
mar-13	0.90	2.47	0.005	0.10	OK	0.0461	0.06	OK	0.8160	2.37
abr-13	0.90	2.49	0.003	0.10	OK	0.0449	0.06	OK	0.8230	2.42
may-13	0.90	2.47	0.000	0.10	OK	0.0417	0.06	OK	0.8157	2.39
jun-13	0.89	2.42	0.000	0.10	OK	0.0398	0.05	OK	0.7895	2.33
jul-13	0.90	2.39	0.004	0.10	OK	0.0386	0.05	OK	0.7846	2.29
ago-13	0.90	2.39	0.000	0.10	OK	0.0402	0.05	OK	0.7865	2.27
sep-13	0.90	2.38	0.000	0.10	OK	0.0399	0.05	OK	0.7833	2.24
oct-13	0.90	2.36	0.000	0.10	OK	0.0417	0.05	OK	0.7759	2.21
nov-13	0.91	2.34	0.000	0.10	OK	0.0397	0.05	OK	0.7714	2.21
dic-13	0.90	2.36	0.000	0.10	OK	0.0381	0.05	OK	0.7777	2.17
ene-14	0.90	2.40	0.000	0.10	OK	0.0386	0.05	OK	0.7869	2.20

Ilustración 31. Resultados de MTBMp de LITRAC.

MTB Mp									
Datos VALRAMOR					Datos WEIBULL				
Mes	Beta	Eta	MTB Mp	Intercepto	Mes	Beta	Eta	Intercepto	MTB Mp
jul-10	3.634555	153.677196	138.551178	-18.299455	40360.000000	3.774100	152.945900	-18.984041	138.177700
ago-10	1.556383	158.130217	142.159975	-7.880619	40391.000000	1.940700	148.419500	-9.703583	131.620900
sep-10	1.982654	156.381314	138.612694	-10.016955	40422.000000	2.555300	147.526000	-12.761180	130.968800
oct-10	2.040422	173.928307	154.091333	-10.525810	40452.000000	2.404300	167.337500	-12.310047	148.346300
nov-10	2.093223	164.750320	145.921620	-10.684712	40483.000000	2.361000	160.119200	-11.984244	141.902600
dic-10	2.085651	161.155647	142.741802	-10.600052	40513.000000	2.336000	156.816200	-11.808654	138.953200
ene-11	2.287044	157.488533	139.512787	-11.570960	40544.000000	2.498800	154.409500	-12.592973	137.000100
feb-11	2.332079	158.308041	140.271981	-11.810915	40575.000000	2.573700	154.933700	-12.979162	137.572800
mar-11	2.370504	159.455046	141.323401	-12.022634	40603.000000	2.642900	155.772300	-13.342404	138.427800
abr-11	2.400839	161.433989	143.109271	-12.206098	40634.000000	2.683000	157.669100	-13.577318	140.182200
may-11	2.425207	163.852290	145.281452	-12.366045	40664.000000	2.701400	160.167900	-13.712908	142.436900
jun-11	2.459580	164.843550	146.203944	-12.556149	40695.000000	2.764900	160.886900	-14.047632	143.194200
jul-11	2.419343	162.556453	144.125526	-12.316939	40725.000000	2.669900	159.179600	-13.536481	141.502200
ago-11	2.278759	152.637858	135.210807	-11.457758	40756.000000	2.482800	149.682300	-12.435141	132.785400
sep-11	2.315360	151.059756	133.836766	-11.617725	40787.000000	2.532300	148.045800	-12.655224	131.398400
oct-11	2.086088	150.597916	133.390183	-10.460925	40817.000000	2.264700	147.525500	-11.309914	130.674500
nov-11	2.140854	150.855004	133.599605	-10.739207	40848.000000	2.321100	147.895900	-11.597396	131.037600
dic-11	2.130700	149.580620	132.472863	-10.670196	40878.000000	2.317000	146.517600	-11.555216	129.813500
ene-12	2.119351	148.539791	131.553929	-10.598563	40909.000000	2.318500	145.264600	-11.542784	128.704400
feb-12	2.119351	148.539791	131.553929	-10.598563	40940.000000	2.344500	143.835500	-11.649047	127.457700
mar-12	2.208832	147.089528	131.553929	130.267967	40969.000000	2.406800	144.096700	-11.962962	127.745700
abr-12	2.034276	142.102941	125.900931	-10.082994	41000.000000	2.442400	145.631800	-12.165794	129.144600
may-12	2.070721	144.692222	128.167822	-10.301026	41030.000000	2.487100	146.624500	-12.405344	130.078000
jun-12	2.098371	147.770887	130.880417	-10.482754	41061.000000	2.518900	148.095100	-12.589096	131.424000
jul-12	2.016893	147.672956	130.880417	130.852826	41091.000000	2.437400	147.793600	-12.176804	131.424000
ago-12	1.842953	149.015385	130.880417	132.377817	41122.000000	2.129200	148.982800	-10.654157	131.943600
sep-12	1.877166	150.696616	130.880417	133.777216	41153.000000	2.146800	150.045400	-10.757482	132.881600
oct-12	1.914544	160.195844	130.880417	142.118398	41183.000000	2.180600	150.343300	-10.931176	133.144900
nov-12	1.914544	160.195844	130.880417	142.118398	41214.000000	2.156900	148.794500	-10.790035	131.773000
dic-12	1.922641	157.010249	130.880417	139.275086	41244.000000	2.184200	148.980900	-10.929340	131.938700
ene-13	1.853692	152.025169	130.880417	135.020077	41275.000000	2.133900	147.215900	-111.582482	130.377800
feb-13	1.795560	142.297733	126.558750	-8.902245	41306.000000	2.070000	143.169900	-104.163061	126.819600
mar-13	1.562675	134.100891	126.558750	120.507315	41334.000000	1.870100	139.459300	-9.234129	123.818300
abr-13	1.489989	133.640120	120.742239	-7.293720	41365.000000	1.805100	139.023700	-8.907527	123.615000
may-13	1.483356	132.354531	120.742239	119.647711	41395.000000	1.790100	137.929500	-8.819362	122.692200
jun-13	1.364182	130.540618	119.485687	-6.645862	41426.000000	1.655900	137.291000	-8.150510	122.732400
jul-13	1.370885	132.433372	121.116937	-6.698253	41456.000000	1.646600	138.498800	-8.119157	123.867600
ago-13	1.373354	136.098430	124.431089	-6.747808	41487.000000	1.646700	140.427100	-8.142419	125.591600
sep-13	1.358720	135.876599	124.456147	-6.673688	41518.000000	1.631400	139.989200	-8.061670	125.296200
oct-13	1.297787	132.560460	122.471926	-6.342336	41548.000000	1.568300	137.751400	-7.724584	123.742700
nov-13	1.300235	135.800785	125.417875	-6.385700	41579.000000	1.567500	139.596500	-7.741500	125.406500
dic-13	1.094996	116.912513	128.363824	-5.213742	41609.000000	1.551400	139.810200	-7.664359	125.732100
ene-14	1.134345	118.140351	125.365691	-5.412952	41640.000000	1.568200	139.519700	-7.744094	125.332000

Ilustración 32. Resultados de Mp de LITRAC.

Mp										
Date	Beta	Eta	Anderson Darling			Kolmogorov-Smirnov			Intercepto	Mp
			Valor Real	Valor Crítico	Cumple OK o No	Valor Real	Valor Crítico	Cumple OK o No		
jul-10	15.0548	67.5893	0.3653	0.6370	OK AD	0.3467	0.7760	OK KS	-63.4531	65.2760
ago-10	4.1157	77.7751	0.8072	0.6370	OK AD	0.3156	0.5100	OK KS	-17.9247	70.6104
sep-10	4.1645	74.0619	0.3698	0.4380	OK KS2	0.3739	0.4380	OK KS	-17.9334	67.2848
oct-10	3.7957	75.6940	0.3277	0.3880	OK KS2	0.3355	0.3880	OK KS	-16.4284	68.4070
nov-10	4.0387	71.0278	0.3113	0.3380	OK KS2	0.3113	0.3380	OK KS	-17.2228	64.4151
dic-10	4.0387	71.0278	0.3113	0.3380	OK KS2	0.3113	0.3380	OK KS	-17.2228	64.4151
ene-11	3.4316	74.6848	0.3041	0.3140	OK KS2	0.3041	0.3140	OK KS	-14.8063	67.1277
feb-11	3.9489	73.9384	0.2739	0.3040	OK KS2	0.2739	0.3040	OK KS	-16.9986	66.9691
mar-11	4.0266	72.0427	0.3019	0.2860	OK KS2	0.2849	0.2860	OK KS	-17.2283	65.3243
abr-11	4.2692	73.1264	0.2767	0.2780	OK KS2	0.2767	0.2780	OK KS	-18.3301	66.5300
may-11	4.4287	73.2438	0.2661	0.2720	OK KS2	0.2516	0.2720	OK KS	-19.0222	66.7785
jun-11	4.4494	74.3779	0.2501	0.2640	OK KS2	0.2409	0.2640	OK KS	-19.1795	67.8308
jul-11	4.5868	74.6344	0.2408	0.2592	OK KS2	0.2238	0.2592	OK KS	-19.7877	68.1850
ago-11	4.7910	74.8276	0.2306	0.2496	OK KS2	0.1884	0.2496	OK KS	-20.6809	68.5346
sep-11	5.0009	74.8953	0.2216	0.2400	OK KS2	0.1816	0.2400	OK KS	-21.5915	68.7672
oct-11	5.1356	75.8537	0.2035	0.2320	OK KS2	0.1665	0.2320	OK KS	-22.2381	69.7541
nov-11	5.0154	77.6300	0.1887	0.2240	OK KS2	0.1542	0.2240	OK KS	-21.8338	71.2901
dic-11	5.1619	77.7826	0.1812	0.2180	OK KS2	0.1489	0.2180	OK KS	-22.4817	71.5490
ene-12	5.2968	77.9181	0.1531	0.2140	OK KS2	0.1531	0.2140	OK KS	-23.0785	71.7798
feb-12	4.7968	76.7852	0.1374	0.2100	OK KS2	0.1374	0.2100	OK KS	-20.8299	70.3325
mar-12	4.7824	77.2558	0.1434	0.2006	OK KS2	0.1434	0.2006	OK KS	-20.7965	70.7512
abr-12	4.8180	76.1040	0.1461	0.1954	OK KS2	0.1461	0.1954	OK KS	-20.8789	69.7264
may-12	4.6444	74.6227	0.1479	0.1883	OK KS2	0.1479	0.1883	OK KS	-20.0350	68.2236
jun-12	4.5827	74.0208	0.1476	0.1860	OK KS2	0.1476	0.1860	OK KS	-19.7320	67.6209
jul-12	4.3641	73.4529	0.1385	0.1839	OK KS2	0.1385	0.1839	OK KS	-18.7572	66.9121
ago-12	4.3641	73.4529	0.1385	0.1839	OK KS2	0.1385	0.1839	OK KS	-18.7572	66.9121
sep-12	3.2870	72.3492	0.1374	0.1761	OK KS2	0.1166	0.1761	OK KS	-14.0779	64.8855
oct-12	3.2944	73.1359	0.1359	0.1725	OK KS2	0.1159	0.1725	OK KS	-14.1454	65.5985
nov-12	3.3048	72.2329	0.1195	0.1692	OK KS2	0.1123	0.1692	OK KS	-14.1490	64.7988
dic-12	3.3229	71.7311	0.1110	0.1676	OK KS2	0.1110	0.1676	OK KS	-14.2030	64.3663
ene-13	3.2760	70.5466	0.6138	0.6370	OK AD	0.1025	0.1645	OK KS	-13.9482	63.2583
feb-13	3.2318	69.4546	0.5582	0.6370	OK AD	0.0948	0.1616	OK KS	-13.7094	62.2373
mar-13	3.2200	68.4500	0.5500	0.6400	OK AD	0.0900	0.1600	OK KS	-13.6125	61.3000
abr-13	3.2200	68.3500	0.6100	0.6400	OK AD	0.0900	0.1600	OK KS	-13.6078	61.2500
may-13	3.1800	67.8400	0.6000	0.6400	OK AD	0.0900	0.1600	OK KS	-13.4149	60.7500
jun-13	3.1900	67.4400	0.5900	0.6400	OK AD	0.0900	0.1500	OK KS	-13.4382	60.4000
jul-13	3.1500	66.5700	0.0800	0.1500	OK KS2	0.0900	0.1500	OK KS	-13.2288	59.5900
ago-13	3.2800	66.4800	0.0800	0.1500	OK KS2	0.0900	0.1500	OK KS	-13.7703	59.5300
sep-13	3.2300	66.3700	0.0900	0.1500	OK KS2	0.0900	0.1500	OK KS	-13.5550	59.4800
oct-13	3.2400	65.8500	0.1000	0.1500	OK KS2	0.1000	0.1500	OK KS	-13.5715	50.0300
nov-13	3.2400	65.8500	0.1000	0.1500	OK KS2	0.1000	0.1500	OK KS	-13.5715	50.0300
dic-13	3.2500	65.5300	0.1000	0.1500	OK KS2	0.1000	0.1500	OK KS	-13.5976	58.7500
ene-14	3.2405	65.1900	0.0900	0.1400	OK KS2	0.0900	14.0000	OK KS	-13.5409	58.4245

Después de realizar los cálculos de las variables por el método de distribuciones se toma el valor del mes de enero 2014 y se hace el cálculo de la disponibilidad alcanzada.

Ilustración 33. Cálculo por distribuciones.

METODO DISTRIBUCIONES							
Distribuciones	20.10	2.20	125.33	58.42	17.32	9.97	0.635
Variables	MTBMc	MTTR	MTBmp	Mp	MTBM	$\bar{M}$	Da

Se observa que los valores que se obtienen por el método de distribuciones son mucho más ceñidos a la realidad que los que se obtienen por el método puntual. Las diferencias entre las variables varían con rangos mayores al 7%, se observan variables con diferencias mayores al 60%.

Ilustración 34. Comparación de diferencia de valores.

COMPARACIÓN DE DIFERENCIAS							
Diferencias	62.30%	43.76%	56.98%	21.25%	61.54%	7.17%	18.40%
Variables	MTBMc	MTTR	MTBmp	Mp	MTBM	$\bar{M}$	Da

La disponibilidad alcanzada de LITRAC en el mes de enero 2014 fue de 63.5% muy diferente al cálculo por el método puntual de 75.1% la diferencia es aproximadamente 18.4%; esta diferencia es notable y bastante impactante para tomar decisiones contractuales en procesos donde esta medida universal es requerida, con esto demostramos que el método puntual es inexacto y no debe utilizarse cuando la compañía lleva la medición de sus mantenimientos preventivos y correctivos.

### 3.3.3 Pronósticos.

Los pronósticos de indicadores CMD de corto plazo, usan la metodología de series temporales usando modelos clásicos o modernos. El método series temporales, se fundamenta en el método científico y utiliza varios softwares, entre ellos PROM (propiedad y desarrollo del asesor Alberto Mora), Statgraphics Centurion (de EAFIT), Forecast Pro XE, Minitab, etcétera.; con sus diferentes Modelos AR.I.MA. y Clásicos (Regresión, Brown, Holt y Winter).

Se aplica la fundamentación científica de las series temporales y se realiza el primer paso con el análisis previo con toda la serie sin recortes, a lo cual se revisa la estructura vertical, determinando nivel; se verifica la estructura horizontal realizando análisis de ruido o aleatoriedad; se revisa la estructura tendencial,

donde se verifica la forma lineal y/o no lineal y se verifica la estructura estacional o cíclica de la serie completa.

Ilustración 35. Fundamentación científica de las Series Temporales.

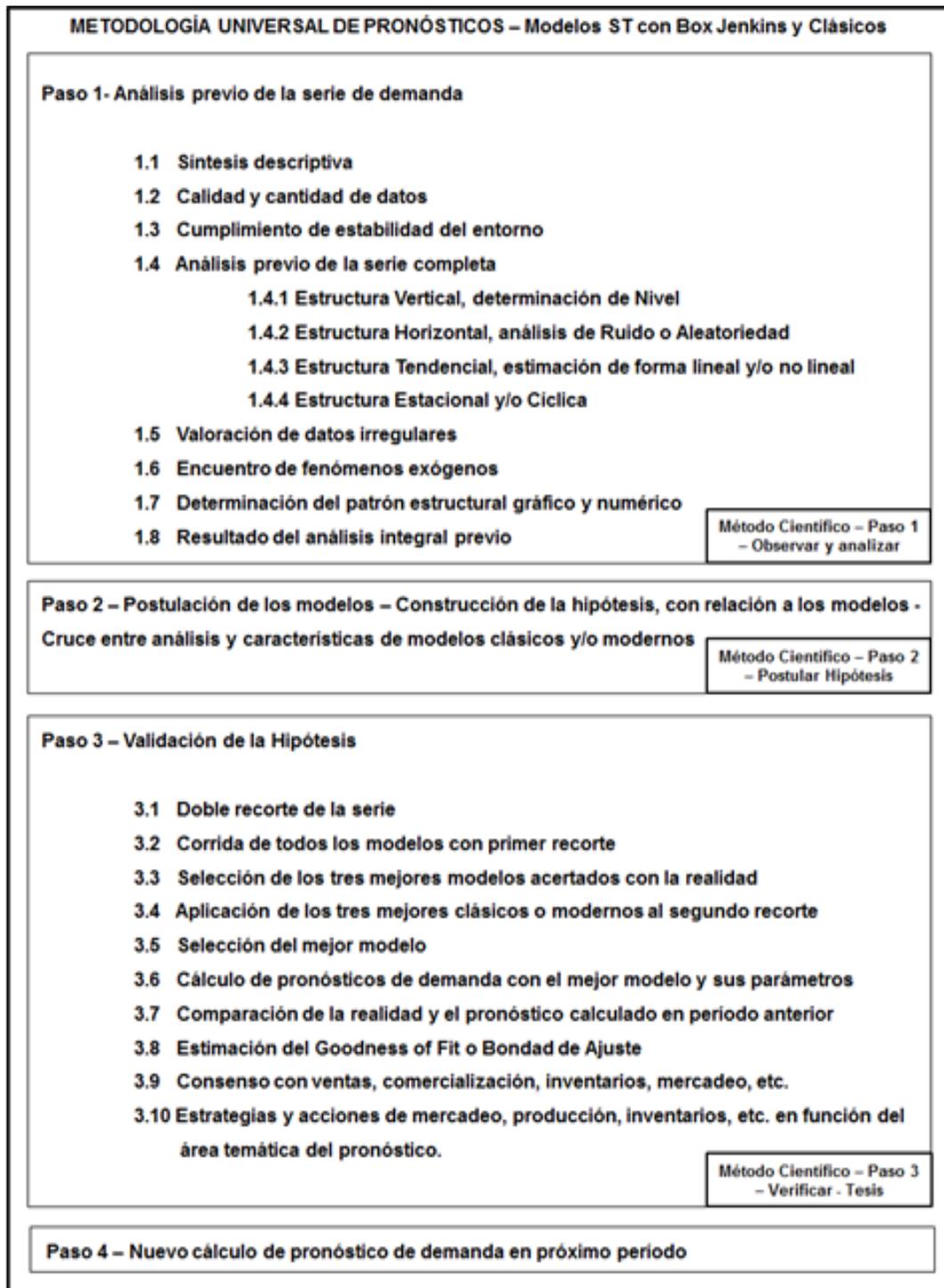


Ilustración 35. Continuación.

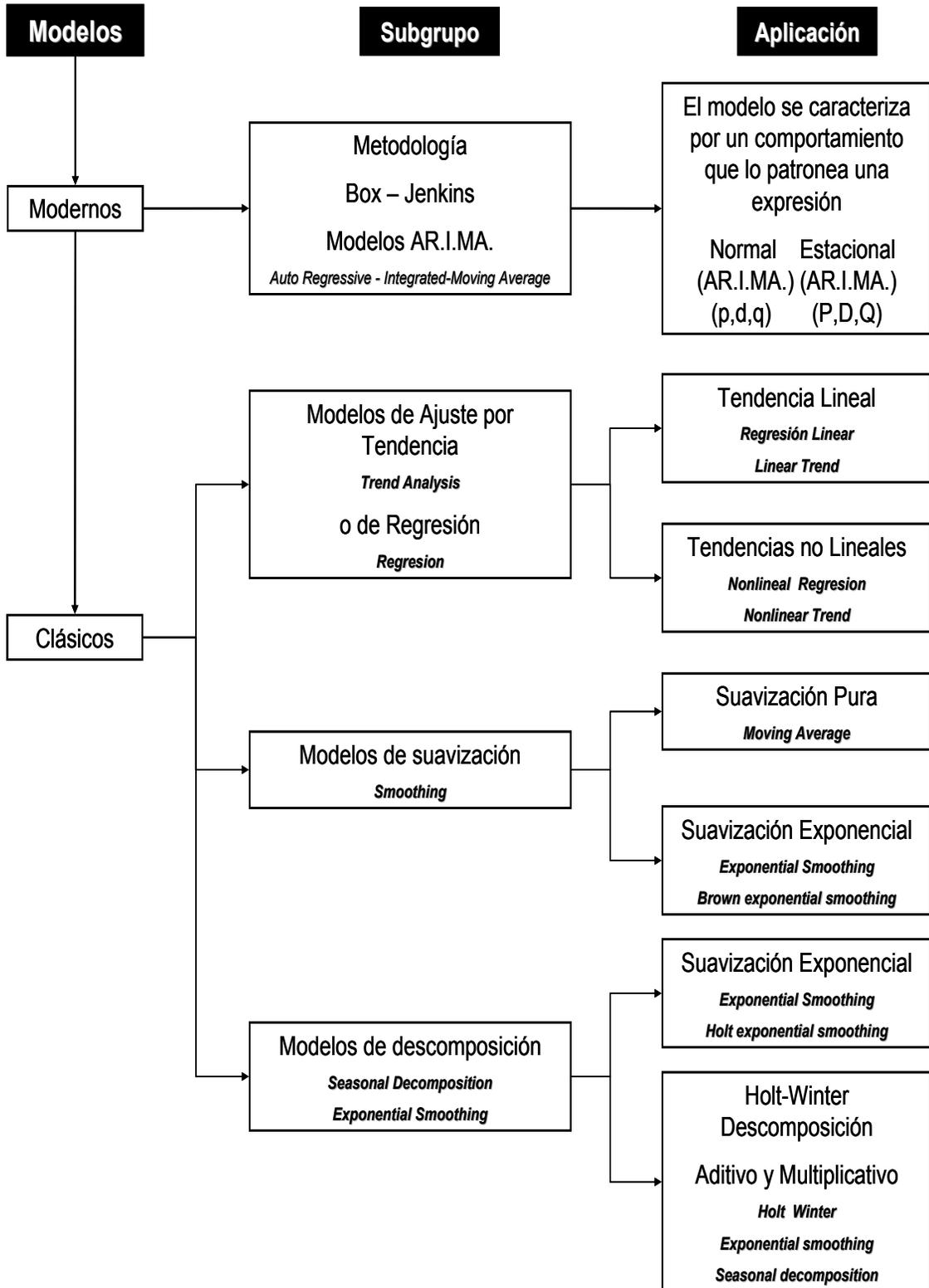
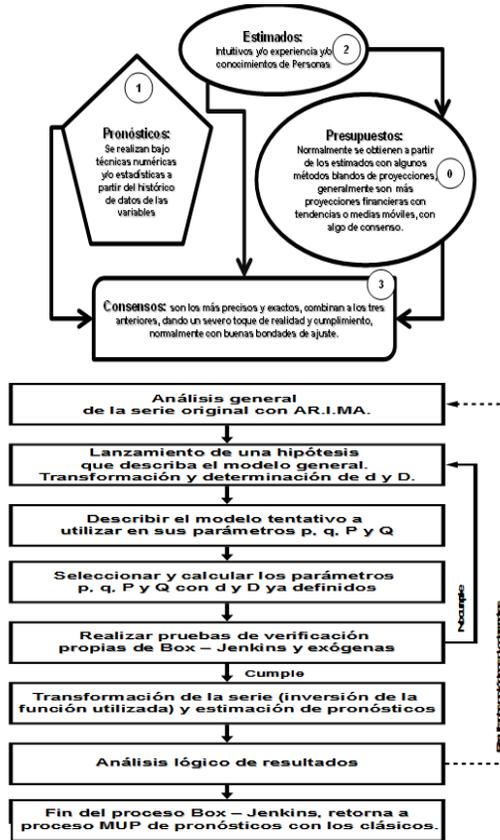


Ilustración 35. Continuación.



(Mora, 2012) (Mora, 2014).

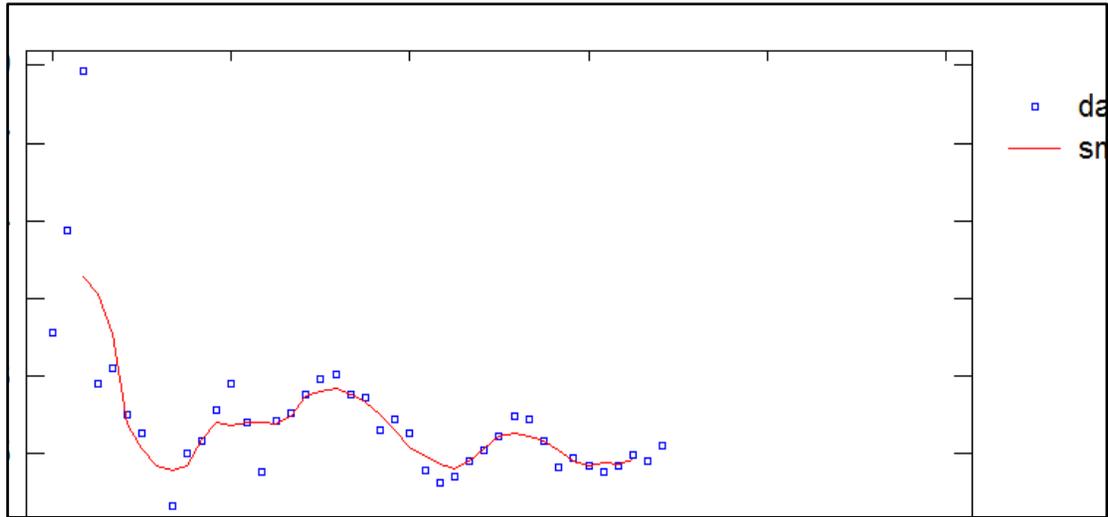
Revisión de la estructura vertical, donde se determina el Nivel, la serie cumple bien al tener variabilidad inferior al 50%, como se observa en los resultados de la ilustración 36.

Ilustración 36. Revisión del Nivel de la serie.

	Variabilidad o Nivel
Con toda la serie	0.03
	0.76
	<b>3.76%</b>
Con 12 datos menos al inicio	0.01
	0.76
	<b>1.63%</b>

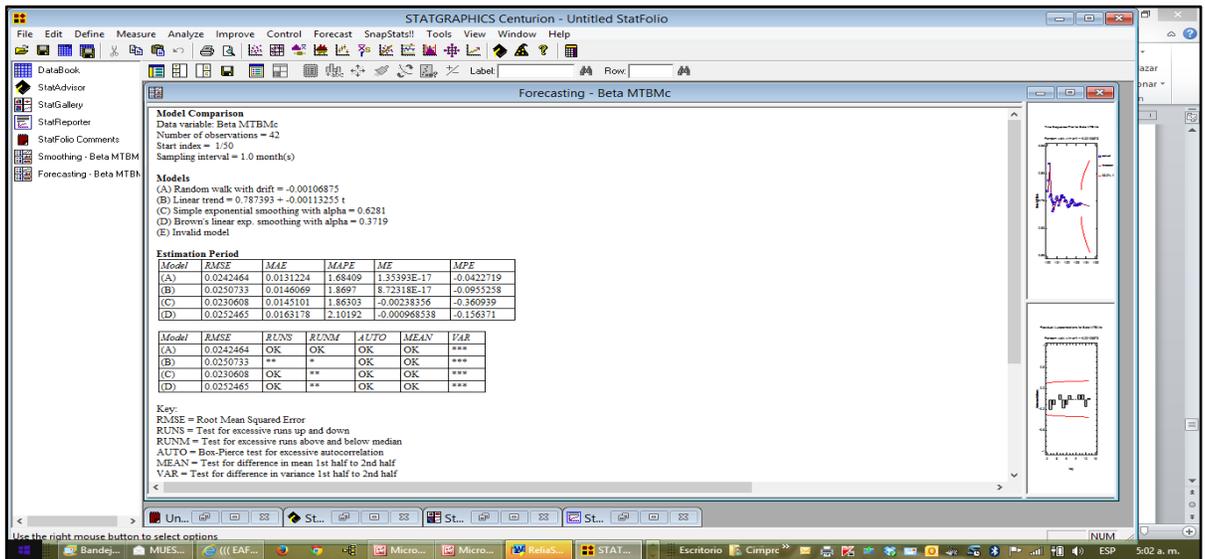
La revisión de la estructura horizontal indica la presencia de ruido o aleatoriedad, porque los puntos originales no coinciden con la línea roja de suavización como lo muestra la ilustración 37.

Ilustración 37. Revisión del Ruido de la serie por software Statgraphics.



La revisión de la estructura tendencial indica que la serie se comporta linealmente con una ecuación lineal extraída de Statgraphics, donde  $Y = 0.787393 - 0.00113255 * \text{Tiempo}$ . Ver ilustración 38.

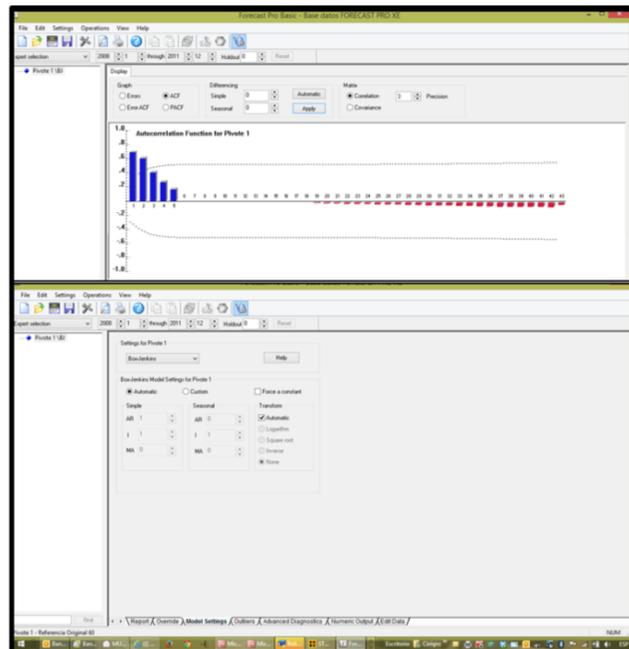
Ilustración 38. Revisión de tendencia de la serie por software Statgraphics.



La prueba *ACF Auto Correlation Function*, en la siguiente figura, dado que los primeros palotes azules salen fuera de la banda de confianza, demuestra que

cumple o sea que sí tiene tendencia a pesar de que la pendiente en la ecuación lineal, es menor a 0.25 y superior a menos 0.25. Se determina que si tiene Tendencia.

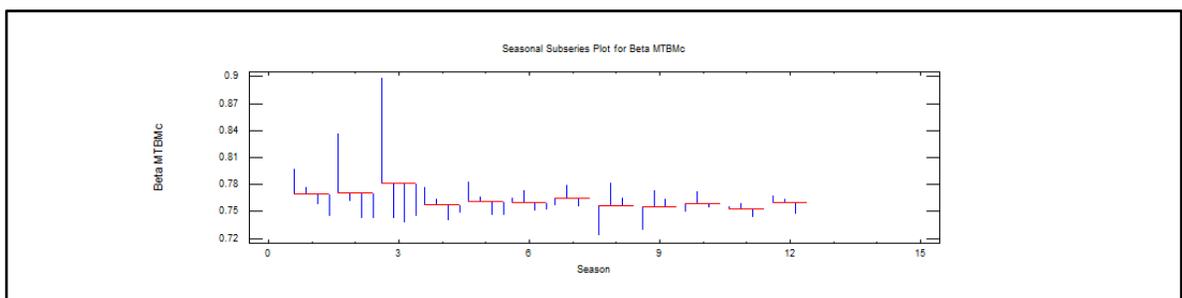
Ilustración 39. Revisión de la tendencia de la serie.



En la revisión de la estructura estacional del resultado del paquete informático Forecast Pro XE, se deduce el modelo AR.I.MA., correspondiente a (1, 1, 0) (0, 1,0), de donde se desprende de una vez que no hay estacionalidad al tener los valores P (4) y Q (6) en cero.

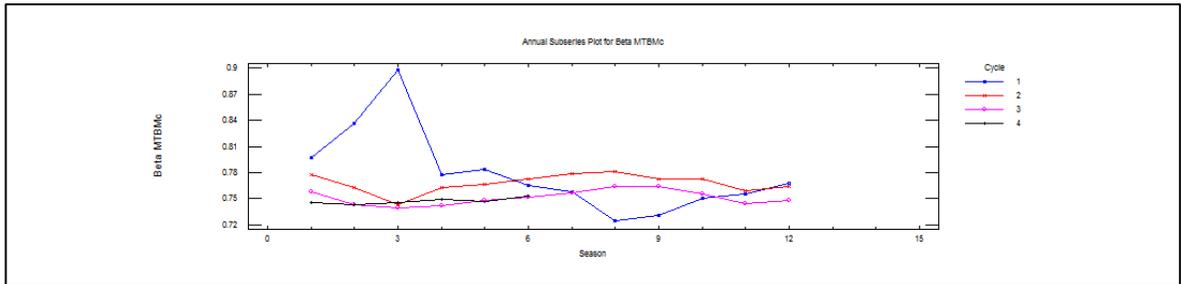
Se comprueba que no tiene estacionalidad o Ciclicidad por el paquete informático Forecast Pro XE y en Statgraphics tampoco cumple. En la ilustración 40 de Statgraphics, los iconos y sus palotes superiores e inferiores deben ser iguales para que haya estacionalidad y no la hay.

Ilustración 40. Revisión de la Estacionalidad de la serie.



En la revisión de Ciclicidad se concluye que para para que haya Ciclicidad no debe haber cruces, solo paralelismo perfecto y no lo hay, no hay fenómenos cíclicos en la serie. Ver ilustración 41.

Ilustración 41. Revisión de la Ciclicidad de la serie.



El paso dos es la postulación del modelo y la creación de la hipótesis, basándose en la revisión del paso uno se realiza una tabla de síntesis donde se determina las condiciones del modelo que servirá de hipótesis.

Ilustración 42. Síntesis del análisis previo de la serie.

Síntesis del Análisis Previo	Alto	Medio	Bajo	Muy leve	Inexistente
Estructura Vertical NIVEL					X
Estructura Horizontal RUIDO		X			
Estructura TENDENCIAL	X				
Estructura ESTACIONAL					X <sub>mes</sub>
Estructura CÍCLICA					X <sub>12}X<sub>24}X<sub>36}X<sub>48</sub></sub></sub></sub>
Irregularidades					X
Existencia de patrón adecuado	X				
Fenómenos exógenos					X

Se define la hipótesis, el modelo ganador debe tener modelación para ruido y tendencia, o sea un Holt.

El paso tres es la validación de la hipótesis, la serie se prepara con dos recortes, ver ilustración 43. El paso, es recortar cada uno de los ocho valores (Un  $\beta$  y un  $\eta$  de cada uno de los parámetros Weibull  $MTBMC$ ,  $MTTR$ ,  $MTBMP$  y  $MP$ ), con el fin de pronosticar dicho valor con series temporales, para observar cómo es el comportamiento en cada caso, frente a los mismos pronósticos obtenidos con Distribución Weibull (se aclara que no es necesario utilizar otra Distribución porque todos los *Goodness of Fit* cumplen adecuadamente).

Ilustración 43. Preparación de recortes de la serie.

Dato	Mes Año	Variable	Calidad
1	ene-10	0.796818351	
2	feb-10	0.836481196	
3	mar-10	0.89761004	
4	abr-10	0.777	
5	may-10	0.783	
6	jun-10	0.765	
7	jul-10	0.738	
8	ago-10	0.724	
9	sep-10	0.73	
10	oct-10	0.75	
11	nov-10	0.753	
12	dic-10	0.767	
13	ene-11	0.777	
14	feb-11	0.762	
15	mar-11	0.743	
16	abr-11	0.763	
17	may-11	0.766	
18	jun-11	0.773	
19	jul-11	0.779	
20	ago-11	0.781	
21	sep-11	0.773	
22	oct-11	0.772	
23	nov-11	0.7591	
24	dic-11	0.7634	
25	ene-12	0.7582	
26	feb-12	0.7434	
27	mar-12	0.7386	
28	abr-12	0.7415	
29	may-12	0.7473	
30	jun-12	0.7512	
31	jul-12	0.7569	
32	ago-12	0.7644	
33	sep-12	0.7636	
34	oct-12	0.7549	
35	nov-12	0.7446	
36	dic-12	0.7484	
37	ene-13	0.7434	
38	feb-13	0.743	
39	mar-13	0.7456	
40	abr-13	0.7494	
41	may-13	0.747	
42	jun-13	0.753	Recorte 1
43	jul-13	0.7410	Proycción

En el primer paso, se realizan los pronósticos con los dos recortes y se realizan pronósticos que por comparación otorgan los mejores primeros cuatro Modelos de Pronósticos.

Ilustración 44. Comparación cuatro primeros modelos de pronósticos de la serie.

#	Software	Modelos	Símbolo	Diferencia	Puesto		Modelo
	Vanguard Decision Making SPSS	Log Theta 1 1	LT 1 1	0.00000011147	1	Sí se toma	LT 1 1
2	Premo Holt	Alfa = 0.35 y Beta 0.00001	SEST	0.00000027397	2	Sí se toma	SEST
1	Premo Brown	Alfa = 0.35	SES	0.00000027414	3	No se toma	
9	Premo No Lineal XPONENTIAL	Exponencial (-0.24 + -0.0016 * t)	DAE	0.00000029437	4	Sí se toma	DAE
7	Premo Linear Regresión	0.78993 + -0.00132 * t	DAT	0.00000039156	5	Sí se toma	DAT
3	Premo Brown Double	Alfa = 0.35	DES	0.00000043751	6	No se toma	
10	Premo No Lineal Curva en S	Exponencial (-0.27998 + 0.10893 / * t)	DAS	0.00000081767	7	No se toma	
6	Holts Winter Multiplicativo	Alfa = 0.01799, Beta = 0.35 y Gamma = 0.96	HWM	0.00000096736	8	No se toma	
4	Premo Brown Double with Time	Alfa = 0.32137	DEST	0.00000098315	9	No se toma	
16	ARIMA Forecast Pro XE	(1,0,0)(0,0,0)	ARIMA FCXE	0.00000112544	10	No se toma	
15	ARIMA Statgraphics	(1,0,0)(0,0,0)	ARIMA STATG	0.00000121247	15	No se toma	
8	Premo No Linear Quadratic	0.73986 + 0 * t + 0 * t^2	DAQ	0.00000392272	16	No se toma	
5	Holts Winters Aditivo	Alfa = 0.01552, Beta = 0.13718 y Gamma = 1	HWA	0.00000649727	17	No se toma	
	Realidad	Real					

Para esta primera etapa ganan los Modelos Clásicos Vanguard Decision Making LT11, Holt SEST, Regresión No Lineal Exponencial DAE y Regresión Lineal DAT.

Ahora a cada uno de los cuatro se le ejecutan pronósticos con la serie recortada en un dato para tomar el mejor.

Ilustración 45. Cuadro para seleccionar el mejor método de pronóstico.

Segundo recorte				
Modelo				
Dato	DAT	DAE	SEST	L T 1 1
Diferencia	0.7	0.7	0.7	0.7
	021	019	003	007
			Seleccionado	
			Se toma este	
				Realidad
				0.7530

El Modelo ganador es un Holt SEST *Smoothing Exponencial Smoothing Time* con Alfa 0.33 y Beta de 0.00001, lo que coincide con la Hipótesis, es decir cumple el método científico.

Una vez se usa el patrón del Statgraphics, se puede entonces solicitar los Pronósticos los cuales patroneados dan para esta Serie  $\beta$  *MTBM<sub>C</sub>*, se realiza para cada una de las doce [12] variables. El siguiente paso es verificar la bondad de ajuste con los pronósticos. Ver Anexo D.

Ilustración 46. Prueba de bondad de ajuste para doce variables.

Pronósticos hechos con Distribuciones - Caso Welbull y sus valores														
43	ene-14	0.7543	16.9648	20.1046	0.8997	2.0872	2.1955	1.1343	119.4484	125.3320	3.2485	65.1989	59.4245	
Pronósticos con Series Temporales para verificar la Bondad de Ajuste de Distribuciones versus Series Temporales														
Variable	Fecha	Variable 1	Variable 2	Variable 3	Variable 4	Variable 5	Variable 6	Variable 7	Variable 8	Variable 9	Variable 10	Variable 11	Variable 12	
A	ene-14	0.7410	17.1990	19.8332	0.8878	2.0744	2.2079	1.052	117.9709	127.8961	3.2249	64.0872	58.2360	
B	feb-14	0.7341	16.8463	19.5552	0.8900	2.0614	2.1487	1.0459	119.1230	126.6486	3.2420	65.2388	58.6958	
C	mar-14	0.7351	16.5469	19.1546	0.8846	2.0692	2.1493	1.0776	119.8235	127.5242	3.2871	64.9294	57.9752	
D	abr-14	0.7397	16.7838	19.4290	0.8873	2.0656	2.1337	1.0522	120.2338	128.4478	3.2978	65.1642	58.1936	
E	may-14	0.7335	16.8850	19.4676	0.8846	2.0636	2.1142	1.0855	121.3070	129.1314	3.2858	66.4179	59.3388	
F	jun-14	0.7395	17.0199	19.6395	0.8868	2.0697	2.1162	1.1100	120.6370	129.8237	3.2952	66.4976	59.5672	
Error o Bondad de Ajuste del Primer Pronóstico														
Error Medio		0.47%	1.79%	-1.36%	1.37%	1.34%	0.62%	-0.52%	1.71%	0.44%	-1.97%	0.48%	1.06%	0.22%
Variable 1	Variable 2	Variable 3	Variable 4	Variable 5	Variable 6	Variable 7	Variable 8	Variable 9	Variable 10	Variable 11	Variable 12			
Acciones de Reparaciones - NO PLANEADAS														
MTBMC			MTTR			MTBM <sub>C</sub>			M <sub>r</sub>					
β			Eta			MTTR			M <sub>r</sub>					

Pronósticos con Series Temporales para verificar la Bondad de Ajuste de Distribuciones versus Series Temporales			
Variable 1	Variable 2	Variable 3	
Holt	AR.I.MA. (010)[000]	Brown	
A	ene-14	0.7410	17.1990
B	feb-14	0.7341	16.8463
C	mar-14	0.7351	16.5469
D	abr-14	0.7397	16.7838
E	may-14	0.7335	16.8850
F	jun-14	0.7395	17.0199
Error o Bondad de Ajuste del Primer Pronóstico			
Error Medio	0.53%	1.79%	-1.36%
			1.37%
Variable 1	Variable 2	Variable 3	
Acciones de Reparaciones - NO PLANEADAS			
MTBMC			
β			
Eta			
MTBMC			

Pronósticos con Series Temporales para verificar la Bondad de Ajuste de Distribuciones versus Series Temporales			
Variable 4	Variable 5	Variable 6	
AR.I.MA. (102)[000]	AR.I.MA. (010)[000]	Brown	
A	ene-14	0.8878	2.0744
B	feb-14	0.8900	2.0614
C	mar-14	0.8846	2.0692
D	abr-14	0.8873	2.0656
E	may-14	0.8846	2.0636
F	jun-14	0.8868	2.0697
Error o Bondad de Ajuste del Primer Pronóstico			
Error Medio	0.48%	1.34%	0.62%
			-0.52%
Variable 4	Variable 5	Variable 6	
Acciones de Reparaciones - NO PLANEADAS			
MTTR			
β			
Eta			
MTTR			

Ilustración 46. Continuación.

Pronósticos hechos con Distribuciones - Caso Weibull y sus valores					Pronósticos hechos con Distribuciones - Caso Weibull y sus valores				
43	ene-14	1.1343	118.1404	125.3320	43	ene-14	3.2405	65.1900	58.4245
Pronósticos con Series Temporales para verificar la Bondad de Ajuste de Distribuciones versus Series Temporales					Pronósticos con Series Temporales para verificar la Bondad de Ajuste de Distribuciones versus Series Temporales				
		Variable 7	Variable 8	Variable 9			Variable 10	Variable 11	Variable 12
A	ene-14	1.1152	117.9715	127.8501	A	ene-14	3.2249	64.0027	58.2960
B	feb-14	1.0450	115.1210	126.6486	B	feb-14	3.2420	65.2388	58.6058
C	mar-14	1.0776	115.8335	127.5342	C	mar-14	3.2071	64.9294	57.9753
D	abr-14	1.0522	120.2338	128.4478	D	abr-14	3.2578	65.8642	58.8916
E	may-14	1.0865	121.3070	129.1314	E	may-14	3.2858	66.4179	59.3968
F	jun-14	1.1110	120.6570	129.8237	F	jun-14	3.2952	66.4926	59.5672
Error o Bondad de Ajuste del Primer Pronóstico					Error o Bondad de Ajuste del Primer Pronóstico				
Error Medio	0.68%	1.71%	0.14%	-1.97%	Error Medio	0.68%	0.48%	1.86%	0.22%
		Variable 7	Variable 8	Variable 9			Variable 10	Variable 11	Variable 12
		Acciones de Mantenimiento - PLANEADAS					Acciones de Mantenimiento - PLANEADAS		
		MTBM <sub>p</sub>					M <sub>p</sub>		
		beta	Eta	MTBM <sub>p</sub>			beta	Eta	M <sub>p</sub>

Con relación a la realidad nuevamente se ratifica Series temporales, aunque por un bajo margen.

Ilustración 47. Bondad de Ajuste contra la realidad de los cuatro tiempos.

Bondad de ajuste contra la realidad de los cuatro Tiempos en Enero 2014							
43	ene-14			Realidad			Realidad
				17.9100			7.7600
				MTBMC			MITTR
Error Promedio Weibull	9.31%	Weibull	-12.25%	20.1046	Weibull	71.69%	2.1965
Error Promedio Series Temporales	9.44%	Series Temporales	-10.74%	19.8332	Series Temporales	71.55%	2.2079
Bondad de ajuste contra la realidad de los cuatro Tiempos en Enero 2014							
43	ene-14			Realidad			Realidad
				209.1500			36.0000
				MTBMP			MP
Error Promedio Weibull	9.31%	Weibull	40.08%	125.3320	Weibull	-62.29%	58.4245
Error Promedio Series Temporales	9.44%	Series Temporales	38.87%	127.85009	Series Temporales	-61.93%	58.2960

Conclusión los pronósticos trabajan de forma muy semejante<sup>24</sup> en este caso con Series Temporales y Weibull.

Pronósticos reales futuros a seis meses vista, estos se realizan, mediante la incorporación de los datos del último mes, ya para realizarlo en firme, lo anterior solo es para concluir que la Bondad de Ajuste de las Series temporales para pronósticos frente a Distribuciones, como Weibull son muy semejantes en este caso particular.

<sup>24</sup> La bondades de ajuste lo correcto es que no pasen del 10%, acá están sobre el 9.44% luego cumple.

El proceso, arroja los siguientes resultados en las doce (12) variables, que constan de cuatro (04) valores de Mantenimiento y de sus ocho (08) parámetros. En cada una de las doce (12) variables se hace el proceso completo de pronósticos por series temporales, similar para cada uno, tal cual esboza la siguiente ilustración.

Ilustración 48. Pronóstico de la variable 1 -  $\beta_C$ .

Dato	Mes Año	Variable	Calidad	
36	jun-13	0.7484	Recorte 2	Pronósticos Originales
37	jul-13	0.7454		
38	ago-13	0.743		
39	sep-13	0.7456		
40	oct-13	0.7494		
41	nov-13	0.747		
42	dic-13	0.753	Recorte 1	Pronóstico inicial
43	ene-14	0.7410	Pronóstico	0.7
44	feb-14	0.7341	Estimado	0.7
45	mar-14	0.7351	Especulativo	0.7
46	abr-14	0.7397	Especulativo	0.7
47	may-14	0.7335	Especulativo	0.7
48	jun-14	0.7395	Especulativo	0.7

Ilustración 49. Pronósticos finales de Acciones de Reparación.

PRONÓSTICOS		Variable 1	Variable 2	Variable 3	Variable 4	Variable 5	Variable 6
Acciones de Reparaciones - NO PLANEADAS							
#	Período	MTBMC			MTTR		
A	feb-14	0.7579	16.9138	19.8848	0.8997	2.1135	2.2079
B	mar-14	0.7476	16.5203	19.6332	0.8964	2.0669	2.1487
C	abr-14	0.7343	16.1819	19.5148	0.8998	2.0712	2.1493
D	may-14	0.7448	16.4137	19.5744	0.8983	2.0549	2.1337
E	jun-14	0.7493	16.4463	19.5145	0.8974	2.0347	2.1142
F	jul-14	0.7553	16.5865	19.5637	0.9001	2.0398	2.1162
		Variable 1	Variable 2	Variable 3	Variable 4	Variable 5	Variable 6
Acciones de Reparaciones - NO PLANEADAS							

Ilustración 50. Pronósticos finales de Acciones de Mantenimiento.

PRONÓSTICOS		Variable 7	Variable 8	Variable 9	Variable 10	Variable 11	Variable 12
Acciones de Mantenimiento - PLANEADAS							
#	Período	MTBM <sub>p</sub>			MP		
Número	Mes	Beta MTBM <sub>p</sub>	Eta MTBM <sub>p</sub>	MTBM <sub>p</sub>	Beta M <sub>p</sub>	Eta M <sub>p</sub>	M <sub>p</sub>
A	feb-14	1.1348	118.6563	127.8844	3.2967	64.6017	58.3254
B	mar-14	1.0853	116.3820	126.3762	3.4438	64.9053	58.2442
C	abr-14	1.1191	117.1023	127.2716	3.0978	64.5975	57.6176
D	may-14	1.0927	121.5507	128.1948	3.1762	65.5270	58.5287
E	jun-14	1.1283	122.6364	128.8882	3.1799	66.0785	59.0305
F	jul-14	1.1537	121.9784	129.5900	3.2833	66.1529	59.1999
		Variable 7	Variable 8	Variable 9	Variable 10	Variable 11	Variable 12
Acciones de Mantenimiento - PLANEADAS							

La Disponibilidad Alcanzada para los pronósticos se muestra en la siguiente ilustración.

Ilustración 51. Disponibilidades Alcanzadas para pronósticos.

Disponibilidad Alcanzada para los pronósticos							
Pronósticos	MTBMc	MTTR	MTBMp	Mp	MTBM	$\bar{M}$	Da
feb-14	19.8848	2.2079	127.8844	58.3254	17.2090	9.7594	0.6381
mar-14	19.6332	2.1487	126.3762	58.2442	16.9932	9.6916	0.6368
abr-14	19.5148	2.1493	127.2716	57.6176	16.9203	9.5237	0.6399
may-14	19.5744	2.1337	128.1948	58.5287	16.9815	9.6041	0.6387
jun-14	19.5145	2.1142	128.8882	59.0305	16.9484	9.5985	0.6384
jul-14	19.5637	2.1162	129.5900	59.1999	16.9976	9.6036	0.6390

Las disponibilidades alcanzadas para los pronósticos son ligeramente superiores que la disponibilidad alcanzada del mes de enero 2014.

### 3.4 CONCLUSIONES DEL CAPITULO

- El método puntual queda claramente demostrado que es inexacto para poder medir disponibilidad alcanzada.
- El método universal de cálculo de variables por medio de distribuciones nos entrega resultados que se ciñen más a la realidad que ocurre.
- El MTBMc con valores cercanos a 20 horas muestra que el correctivo no está siendo efectivo.
- El MTBMp con valores de ciento veinte a ciento treinta horas es una frecuencia muy baja, el mantenimiento es muy continuo.
- El MTTR es bajo es una situación benéfica.
- El Mp ha estado a la baja se requiere plantear alternativas para subirlo.
- El factor de forma Beta para los mantenimientos correctivos está en un valor menor a uno (1), está situado en la curva Davies en el área de mortalidad infantil y esto se debe a los mantenimientos frecuentes que se realizan para mantener el equipo como nuevo; no permitiendo salir de esta etapa.

- El factor de forma Beta para el tiempo útil MTBMp con valores mayores a uno (1) pero muy cerca a la unidad (1), muestran que el mantenimiento preventivo no está siendo efectivo.
- El factor de forma Beta para la variable Mp esta excelente, tiene una tendencia a la baja que debe cambiarse.

## 4 ESTRATEGIA

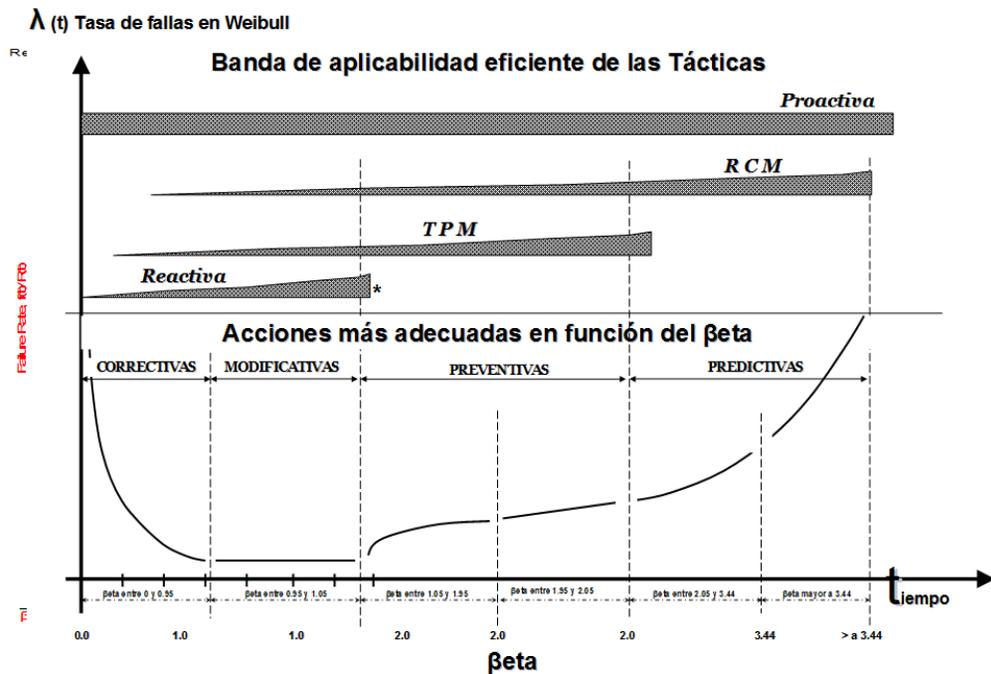
### 4.1 OBJETIVO

Plantear estrategias, tácticas, acciones de mantenimiento y herramientas específicas avanzadas en LITRAC, para alcanzar un nivel de mantenimiento efectivo deseado a partir de la interpretación de curvas CMD.

### 4.2 INTRODUCCIÓN

La estrategia del mantenimiento se diseña definiendo la táctica recomendada de acuerdo al análisis de las variables CMD que nos entregan la información del factor de forma Beta de la distribución de Weibull cuyos rangos se estipulan en la curva de Davies como se indica en la siguiente ilustración.

Ilustración 52. Deber ser del mantenimiento.



(Mora, 2009)

### 4.3 ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS PARA LITRAC

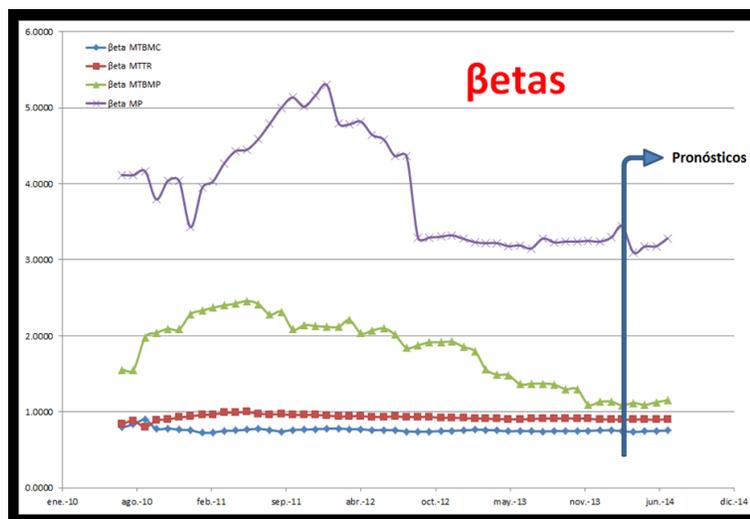
La información de doce (12) variables, que se identifican como: cuatro factores de forma (Beta), cuatro factores de escala (Eta) (un factor de cada tipo por variable) y las cuatro variables MTTR, MTBMc, MTBMp y Mp se tabulan y se grafican para buscar su comportamiento y tomar decisiones con respecto a la escogencia de las tácticas que conforman la estrategia que se debe seguir en LITRAC en el corto plazo.

#### 4.3.1 Análisis de los Betas de LITRAC.

El análisis del factor de forma Beta de las variables MTBMc, MTTR, MTBMp y Mp nos muestra las siguientes conclusiones:

4.3.1.1 Análisis de los Betas planeados Preventivos-Predictivos. El factor Beta de MTBMp está por encima de uno, aunque muy en el límite, la empresa escasamente puede poner en práctica el TPM o los mantenimientos preventivos, de tal forma que no impactan la producción, el deber ser señala que debe apretar más en este sentido, debe hacer más predictivo y más análisis a ver cuál de los planeados está influenciando la producción, pues podría ampliarse más los tiempos, sin paradas planeadas, o sea ampliar la frecuencia para ejecutar un mantenimiento preventivo.

Ilustración 53. Betas de LITRAC.



La ilustración 53 muestra un comportamiento, el factor  $\beta$  de MTBMp, está estable aunque debe mejorarse como se especificó anteriormente, se debe realizar mejores preventivos; deben cambiarse por predictivos planeados, nótese y es lo que preocupa y el punto a mejorar, que al inicio de la primera mitad estuvo muy alto, luego baja y se estabiliza, pero tiende a la baja futura y ese se debe

atacar pronto, con más y mejor predictivo, se debe tratar de regresar a los valores más altos anteriores, pues está impactando los tiempos útiles planeados.

El factor Beta de  **$M_p$**  está excelente, es superior al 3.44, debe sostener el predictivo que está haciendo y reforzarlo de ser posible a ver si alcanza betas superiores al 7, que es lo ideal, al igual practicar en forma el *RCM*. Hay que buscar subir al 7.

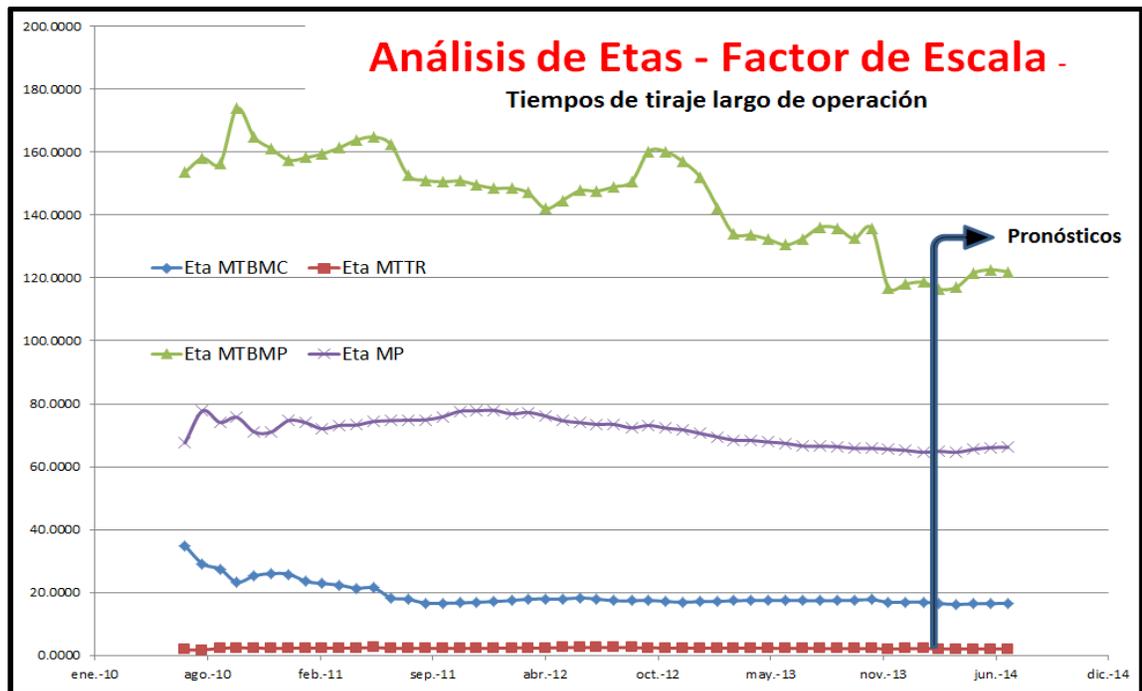
4.3.3.2 Análisis de los Betas no planeados Mantenimiento Correctivo. El factor Beta de  **$MTBM_c$**  está por debajo de 1 acercándose a el, lo que está bien, aunque deben mejorarse, con el fin de que no terminen impactando el tiempo útil en el tiempo, de hecho el tiempo útil de los correctivos es muy bajo de 19.88 horas frente al de los Planeados de 127.88 horas, se empieza a percibir problemas de los correctivos que afectan la confiabilidad.

El factor Beta de  **$MTTR$**  está bastante bien, y mejorando tendiendo cada vez al 1, lo que se hace se debe mantener. En general tienen muy buena estabilidad ambos, en  $MTBM_c$  y en  $MTTR$ , se deben sostener las acciones y ajustar más la aplicación de FMECA y de sus resultados aplicar mejores correctivos y modificativos.

4.3.3.3 Análisis comparativo de los Betas preventivo y correctivo. A pesar de que el Beta del mantenimiento Preventivo & Predictivo, tiende levemente a mejorar, como se muestra en la ilustración 54; debe intensificarse en cambiar preventivos por predictivos eficientes, es decir que impacten en lo Correctivo, para que mejoren ambos; mantenimientos planeados y No planeados en cuanto a betas.

Ilustración 54. Comparativo de Betas Preventivo & Correctivo.

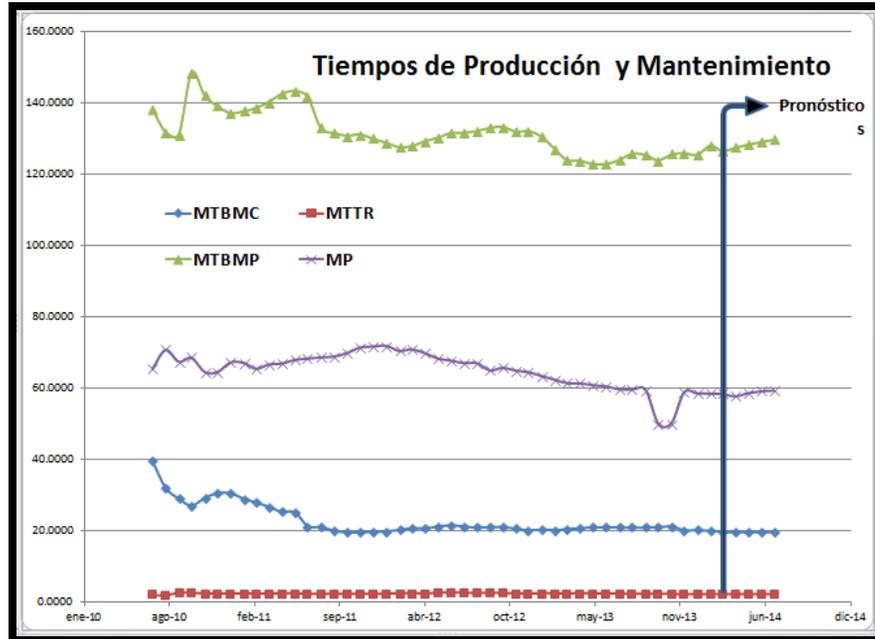




4.3.2.2 Análisis de Etas no planeados Mantenimiento Correctivo. Tal cual análisis anterior; el factor de escala Eta en los correctivos No Planeados de  $MTBM_C$  y de  $MTTR$ , están bien, como se observa en la ilustración 55 están estables, se deben mantener las políticas actuales para evitar que suban.

4.3.2.3 Análisis de los tiempos útiles de Producción y de Mantenimiento. La ilustración 56 muestra resultados coherentes con lo anterior, el punto a mejorar son los predictivos. En general el  $MTMB_P$  debe ser mayor, actualmente tiende a subir, el  $MTBM_C$  está muy bajo, es estable lo que indica que debemos tomar acción para aumentarlo.

Ilustración 56. Tiempos de Producción y Mantenimiento.



El Tiempo  $MTTR$  está estable, va de la mano que su Beta que también está estable. En el  $M_p$ , hay una tendencia a la baja, se debe canjear algunos preventivos por predictivos más efectivos. Se debe extender la frecuencia de las paradas de planta, usando predictivos más eficientes durante la operación.

Ilustración 57. Tiempos de mantenimiento.



### 4.3.3 Tácticas y acciones de mantenimiento para LITRAC.

De acuerdo a los resultados mostrados en el capítulo anterior las acciones recomendadas para LITRAC se agrupan de acuerdo a la variable que se desea mejorar. Mejorar la disponibilidad alcanzada es el objeto del estudio para mejorarla debemos entender cómo se encuentran las variables MTTR, MTBMc, Mp y MTBMp y donde estamos de acuerdo a los parámetros de forma y escala que la distribución de Weibull nos ofrece para tomar las decisiones adecuadas.

4.3.3.1 Tácticas y acciones de mantenimiento para MTBMc. Es importante acentuar que cada ilustración presenta los últimos cinco pronósticos, las recomendaciones para el mejoramiento o mantenimiento de la variable, las acciones de mantenimiento actualmente en uso, la táctica de la curva de Davies donde la variable se encuentra ubicada hoy y los instrumentos avanzados que se deben aplicar para mejorar o mantener la variable.

En la siguiente ilustración se esboza las recomendaciones para el mejoramiento de la variable MTBMc.

Ilustración 58. Resumen acciones MTBMc.

MTBMc		
Variable 1	Variable 2	Variable 3
$\beta$	Eta	MTBM <sub>c</sub>
0.7579	16.9138	19.8848
0.7476	16.5203	19.6332
0.7343	16.1819	19.5148
0.7448	16.4137	19.5744
0.7493	16.4463	19.5145
0.7553	16.5865	19.5637
RECOMENDACIÓN	RECOMENDACIÓN	RECOMENDACIÓN
Beta acercándose a 1 esto está bien; hay que reforzar el análisis de causa raíz y las acciones modificativas para evitar recurrencias	El Eta se mantiene estable, hay que evitar que suba, se deben mantener las políticas actuales para el correctivo.	El tiempo útil muy bajo 20 horas aproximadamente, requiere analizar que pasa con el correctivo no esta siendo contundente y afecta la confiabilidad; verificar si las acciones realmente realizan una corrección definitiva.
ACCIONES	ACCIONES	ACCIONES
CORRECTIVAS	CORRECTIVAS	CORRECTIVAS
MODIFICATIVAS	MODIFICATIVAS	MODIFICATIVAS
TACTICAS	TACTICAS	TACTICAS
REACTIVA	REACTIVA	REACTIVA
INSTRUMENTOS AVANZADOS	INSTRUMENTOS AVANZADOS	INSTRUMENTOS AVANZADOS
RCA- FMECA	RCA	RCA- FMECA
REDISEÑO	FMECA	ANALISIS DE TAREAS

4.3.3.2 Tácticas y acciones de mantenimiento para MTTR. De la misma forma que la anterior variable, la ilustración siguiente esboza las recomendaciones para el mejoramiento de la variable MTTR.

Ilustración 59. Resumen acciones MTTR.

MTTR		
Variable 4	Variable 5	Variable 6
Beta	Eta	MTTR
0.8997	2.1135	2.2079
0.8964	2.0669	2.1487
0.8998	2.0712	2.1493
0.8983	2.0549	2.1337
0.8974	2.0347	2.1142
0.9001	2.0398	2.1162
RECOMENDACIÓN	RECOMENDACIÓN	RECOMENDACIÓN
Beta acercándose a 1 esto está bien; hay que reforzar el análisis de causa raíz y las acciones modificativas para evitar recurrencias	El Eta se mantiene estable, hay que evitar que suba, se deben mantener las políticas actuales para el correctivo.	El tiempo para reparar es bajo, pero se observan reparaciones con mucho tiempo en los últimos años que impactan, e indican que se requiere cambiar la estrategia de los preventivos por predictivos más adecuados a la vida actual de la línea.
ACCIONES	ACCIONES	ACCIONES
CORRECTIVAS	CORRECTIVAS	CORRECTIVAS
MODIFICATIVAS	MODIFICATIVAS	MODIFICATIVAS
TÁCTICAS	TÁCTICAS	TÁCTICAS
REACTIVA	REACTIVA	REACTIVA
INSTRUMENTOS AVANZADOS	INSTRUMENTOS AVANZADOS	INSTRUMENTOS AVANZADOS
RCA- FMECA	RCA- FMECA	RCA- FMECA
REDISEÑO	REDISEÑO	REDISEÑO PARA MANTENIBILIDAD

4.3.3.3 Tácticas y acciones de mantenimiento para MTBMp. De la misma forma que la anterior variable, la ilustración siguiente esboza las recomendaciones para el mejoramiento de la variable MTBMp.

Ilustración 60. Resumen acciones MTBMp.

MTBMP		
Variable 7	Variable 8	Variable 9
Beta	Eta	MTBM <sub>p</sub>
1.1348	118.6563	127.8844
1.0853	116.3820	126.3762
1.1191	117.1023	127.2716
1.0927	121.5507	128.1948
1.1283	122.6364	128.8882
1.1537	121.9784	129.5900
RECOMENDACIÓN	RECOMENDACIÓN	RECOMENDACIÓN
El factor Beta esta levemente por encima de uno, se requiere subirlo para buscar mayor estabilidad, los preventivos escasamente estan impactando a la producción, se requiere un cambio de enfoque hacia acciones mas predictivas buscando elevar el Beta.	El factor Eta esta con tendencia a la baja, se requiere aplicar mayores predictivos para aumentar el factor de escala y buscar mayores tiempos entre mantenimientos.	El Tiempo entre mantenimientos debe aumentar, aplicando paradas planeadas con un intervalo mayor al actual, aplicar predictivos que busquen obtener avisos de modos de fallo a tiempo para evitar los paros. Revisar el alcance de los trabajos pueden ser mantenimientos correctivos planeados
ACCIONES	ACCIONES	ACCIONES
PREVENTIVAS	PREVENTIVAS	PREVENTIVAS
PREDICTIVAS	PREDICTIVAS	PREDICTIVAS
TÁCTICAS	TÁCTICAS	TÁCTICAS
RCM	RCM	RCM
PMO	PMO	PMO
INSTRUMENTOS AVANZADOS	INSTRUMENTOS AVANZADOS	INSTRUMENTOS AVANZADOS
ANALISIS PREDICTIVOS	ANALISIS PREDICTIVOS	ANALISIS PREDICTIVOS
INSPECCIONES RUTINARIAS	INSPECCIONES RUTINARIAS	INSPECCIONES RUTINARIAS

4.3.3.4 Tácticas y acciones de mantenimiento para  $M_p$ . De la misma forma que la anterior variable, la ilustración siguiente esboza las recomendaciones para el mejoramiento de la variable  $M_p$ .

Ilustración 61. Resumen de acciones  $M_p$ .

<b>MP</b>		
Variable 10	Variable 11	Variable 12
$\beta$	Eta	$M_p$
3.2967	64.6017	58.3254
3.4438	64.9053	58.2442
3.0978	64.5975	57.6176
3.1762	65.5270	58.5287
3.1799	66.0785	59.0305
3.2833	66.1529	59.1999
RECOMENDACIÓN	RECOMENDACIÓN	RECOMENDACIÓN
El factor Beta esta muy bien, hay que buscar subirlo, aplicando más predictivo e iniciando procesos de RCM.	El factor Eta tiende a la baja, se requiere se requiere aplicar mayores predictivos para aumentar el factor de escala.	El $M_p$ viene bajando, lo cual no es favorable, se requiere replantear los tiempos de parada de mantenimiento (Ventanas de mantenimiento), buscando aumentar el tiempo entre mantenimientos, aplicando una planeación mas estricta y realizando mayores predictivos.
ACCIONES	ACCIONES	ACCIONES
PREDICTIVAS	PREDICTIVAS	PREDICTIVAS
TACTICAS	TACTICAS	TACTICAS
PROACTIVA	PROACTIVA	PROACTIVA
RCM	RCM	RCM
TPM	TPM	TPM
INSTRUMENTOS AVANZADOS	INSTRUMENTOS AVANZADOS	INSTRUMENTOS AVANZADOS
DST	DST	DST
REDISEÑO	REDISEÑO	REDISEÑO
ANALISIS PREDICTIVOS.	ANALISIS PREDICTIVOS.	ANALISIS PREDICTIVOS.
RCM ANALISIS	RCM ANALISIS	RCM ANALISIS

#### 4.4 CONCLUSIONES DEL CAPITULO

- Mejorar los tiempos entre los correctivos, MTBMc con más análisis de fallas y supervisión, buscar cuáles correctivos impactan la producción, pues probablemente se repite la causa, luego se requiere más análisis de causa raíz.
- Canjear los preventivos por predictivos más efectivos, para buscar modos de fallo y ejecutarlos durante la operación de la maquinaria.

## 5.0 CONCLUSIONES

5.1 OBJETIVO Proponer las conclusiones y las recomendaciones a seguir en LITRAC.

### 5.2 CONCLUSIONES

En LITRAC el análisis de parámetros CMD entrega las siguientes conclusiones:

- Se concluye que la medición de la disponibilidad debe ser del tipo Disponibilidad Alcanzada, debido a que CMSA tiene la información base de tiempos de parada, tiempos de mantenimiento para lograr el cálculo, usar una disponibilidad inherente no garantiza un resultado óptimo, como tampoco aplicar el método puntual que usa promedios, la decisión de usar este tipo de disponibilidad fue acertada.
- Se concluye que conocer los parámetros CMD que componen las diferentes variables para del cálculo de la disponibilidad, es necesario para poder inferir que tácticas y acciones se deben seguir como resultado de los datos que entrega el cálculo al usar distribuciones (Weibull, Log-Normal) como se demostró en el capítulo cuarto.
- Se concluye que la preocupación de la unidad de mantenimiento por la disminución del tiempo de la ventana de mantenimiento se corrobora con el resultado de los valores de la variable  $M_p$ , que indican una tendencia a la baja, mantienen valores cercanos a sesenta (60) horas.
- Se concluye que el mantenimiento correctivo planeado M1, que se aplica con una frecuencia muy corta, genera que el factor de forma Beta del MTTR se ubique en la primera fase de la curva de Davies indicando mortalidad infantil, con valores de Beta menores a uno (1). Los equipos son intervenidos muy a menudo.
- Se concluye que el mantenimiento preventivo aplicado tiene una frecuencia muy pequeña el valor del tiempo útil entre mantenimientos  $MTB_{M_p}$  esta en valores cercanos a ciento veinticinco (125) horas, el factor beta de esta variable está ligeramente superior a uno (1) concluyendo que el mantenimiento preventivo no está siendo efectivo.

- Se concluye que el tiempo entre mantenimientos correctivos MTBMc tiene valores muy pequeños, están cerca a las veinte (20) horas, su factor de forma Beta está ubicado en la primera fase de la curva de Davies siendo consistente con el MTTR.
- Se concluye que el tiempo para reparar MTTR tiene un valor pequeño que es algo positivo debido a que tiene una tendencia estable.
- Se concluye que el factor de forma de la variable Mp se encuentra en valores mayores de tres que es muy bueno, teniendo en cuenta que venía de valores aún mayores cercanos a cinco, lo ideal es elevarlo a siete.

## 6.0 RECOMENDACIONES

Las recomendaciones que se realizan a CMSA para mejorar la disponibilidad de LITRAC son las siguientes:

- Las ventanas de mantenimiento deben ser con una frecuencia de mil cuatrocientas horas útiles, esto quiere decir que el MTBMP debe llegar a eso. (10 superpilas).
- El mantenimiento preventivo de LITRAC debe cambiarse a un mantenimiento predictivo que se ejecute durante la operación del equipo que es el momento en que la maquinaria muestra su estado real de funcionamiento de esta forma es más eficiente.
- Para aumentar el factor de forma del mantenimiento correctivo, se recomienda asegurar los RCA realizados, aumentar la supervisión de los trabajos para evitar que detalles importantes sean pasados por alto para eliminar la recurrencia.
- Realizar ejercicios de RCM para el equipo de la serie, que sea más crítico, que en estos momentos es el Stacker, realizar el ejercicio para los sistemas estructurales y sistema motriz.
- Revisar el histórico de fallos mayores a cincuenta horas y tomar acción extrapolando la falla hacia componentes similares con una vida útil bastante grande (Bandas transportadoras CV01 y Cv02 elemento de fallo tambor)

## 7.0 ANEXOS

ANEXO A. LITRAC BASE DE DATOS Rev. 4. Doc. Excel.

ANEXO B. LITRAC CÁLCULO PUNTUAL Doc. Excel.

ANEXO C. LITRAC RESULTADO DISTRIBUCIONES Doc. Excel.

ANEXO D. LITRAC RESULTADO PRONÓSTICOS Doc. Excel.

ANEXO E. VALRAMOR4 MODIFICADO Doc. Excel.

## BIBLIOGRAFÍA

**Blanchard, Benjamín S, Verma, Dinesh y Peterson, Elmer. 1994.** *Series Nuevas dimensiones en Ingeniería - Mantenibilidad: a key to effective serviceability and maintenance management.* s.l. : Edit. Wiley Interscience - Wiley, John & Sons, Incorporated, 1994. pág. 560. ISBN: 0486438678.

**Blanchard, Benjamin S., Verma, Dinesh y Peterson, Elmer. 1994.** *Mantenibilidad: A key to effective serviceability and maintenance management; New Dimensions in engineering.* [ed.] Stewart Rodney. Segunda. New York : Wiley, John and Sons, Incorporated, 1994. pág. 540. ISBN: 0-471-59132-7.

—. **1994.** *Mantenibilidad: A key to effective serviceability and maintenance management; New Dimensions in engineering.* [ed.] Stewart Rodney. Segunda. New York : Wiley, John and Sons, Incorporated, 1994. pág. 540. ISBN: 0-471-59132-7.

**Blanchard, Benjamin. 1995.** *Ingeniería logística.* Madrid : Isdefe, 1995. pág. 153. ISBN: 84-89338-06X.

**Dhillon, Balbir. 1999.** *Engineering Maintainability: How to design for Reliability and Easy Maintenance.* Houston : Gulf Publishing Company, 1999. ISBN: 088415257X.

*Estadística en los sistemas de confiabilidad.* **Forcadas, Feliu, Jorge. 1983.** N° 4, Medellín. : SAI, Sociedad Antioqueña de Ingenieros y Arquitectos., 1983, Vol. Vol. 1.

**Knezevic, Jezdimir. 1993.** *Reliability, Maintainability and Supportability Engineering- A Probabilistic Approach.* Londres : McGraw Hill, 1993. pág. 292. ISBN 0077076915, 9780077076917.

**Knezevic, Jezdimir. 1996.** Capítulo 2.2.3 Función de mantenibilidad. *Mantenibilidad.* Madrid : Isdefe, 1996.

—. **1996.** Ecuación 2.2 Función de mantenibilidad. *Mantenibilidad.* Madrid : Isdefe, 1996.

**Levin, Richard. 1996.** *Estadística para administradores.* México D. F. : Prentice Hall., 1996. ISBN 0471018333.

**Mora, Alberto - Gutiérrez. 2014.** *Mantenimiento Industrial Efectivo*. Tercera. Medellín : COLDI Limitada, 2014. pág. 348. ISBN 978-958-98902-0-2.

—. **2012.** *Pronósticos de Demanda e Inventarios - Métodos Futurísticos*. [ed.] Alberto Mora Gutiérrez. Tercera. Medellín : AMG, 2012. pág. 306. Vol. Uno. ISBN 978-958-44-0233-2.

—. **2014.** *Stock Cero*. [ed.] CIMPRO SAS. Primera. Medellín : CIMPRO SAS, 2014. pág. 255. ISBN 978-958-583-61-0-5.

**Mora, Gutiérrez, Luis Alberto. 2009.** Capítulo 23 Nivel táctico. *Mantenimiento. Planeación, ejecución y control*. Primera. México D. F. : Alfaomega., 2009, 23 Nivel táctico, pág. 437 y 438.

—. **2009.** Capítulo 3.3 Sistema integral de mantenimiento. *Mantenimiento Planeación, ejecución y control*. Primera. México D.F. : Alfaomega, 2009, Capítulo 3.3, pág. Pag 51.

—. **2009.** Capítulo 4.1 Modelo universal para pronosticar CMD. *Mantenimiento. Planeación, ejecución y control*. México D. F. : Alfaomega, 2009, pág. 71.

**Mora, Gutierrez, Luis Alberto. 2009.** Gráfico 3.12 Niveles y categorías del mantenimiento bajo enfoque sistémico. [aut. libro] Luis Alberto Mora Gutierrez. *Mantenimiento Planeación, ejecución y control*. Primera. México D. F. : Alfaomega., 2009, Capítulo 3.3, pág. 56.

**Mora, Gutiérrez, Luis Alberto. 2009.** Gráfico 4.2 Tiempos importantes, siglas y demás convenciones que se usan en la medición y predicción CMD. Primera. Ciudad de México : Alfaomega, 2009. pág. 528. ISBN: 978-958-682-769-0.

**Mora, Gutiérrez, Luis Alberto. 2009.** Primera. Ciudad de México : Alfaomega, 2009. pág. 528. ISBN: 978-958-682-769-0.

—. **2009.** Capítulo 3.3 Niveles de mantenimiento. *Mantenimiento Planeación, ejecución y control*. Primera. México D.F. : Alfaomega, 2009, Capítulo 3.3, pág. Pag 56.

—. **2009.** Capítulo 4.1.1 Diferentes disponibilidades de mayor uso empresarial. *Mantenimiento. Planeación, ejecución y control*. Primera. México D. F. : Alfaomega., 2009, Capítulo 4, págs. 77-94.

—. **2009.** Capítulo 5.1 Confiabilidad y fallas. *Mantenimiento. Planeación, ejecución y control*. México D. F. : Alfaomega, 2009, págs. 95-97.

—. **2009.** *Mantenimiento Planeación, ejecución y control*. Ciudad de México : Alfaomega, 2009. pág. 528. ISBN: 978-958-682-769-0.

—. **2009.** *Mantenimiento Planeación, ejecución y control*. Ciudad de México : Alfaomega, 2009. pág. 528. ISBN: 978-958-682-769-0.

**Mora, Luis -Gutierrez. 2009.** *Mantenimiento Planeación, ejecución y control.* Ciudad de México : Alfaomega, 2009. pág. 528. ISBN: 978-958-682-769-0.

—. **2009.** *Mantenimiento Planeacion, ejecución y control.* Primera. Ciudad de México : Alfaomega, 2009. pág. 528. ISBN: 978-958-682-769-0.

—. **2007.** *Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios.* Envidado : AMG, 2007. ISBN 979-958-3382185.

—. **2009.** *Mantenimiento planeación, ejecución y control.* Primera. Ciudad de México : Alfaomega., 2009. pág. 528. ISBN: 978-958-682-769-0.

—. **2009.** *Mantenimiento Planeación, ejecución y control.* Ciudad de México : Alfaomega, 2009. pág. 528. ISBN: 978-958-682-769-0.

—. **2009.** *Mantenimiento Planeación, ejecución y control.* Ciudad de México : Alfaomega, 2009. pág. 528. ISBN: 978-958-682-769-0.

—. **2009.** *Mantenimiento Planeación, ejecución y control.* Primera. Ciudad de México : Alfaomega, 2009. pág. 528. ISBN: 978-958-682-769-0.

—. **2009.** *Mantenimiento Planeación, ejecución y control.* Ciudad de México : Alfaomega, 2009. pág. 528. ISBN: 978-958-682-679-0.

—. **2009.** *Mantenimiento Planeación, ejecución y control.* Ciudad de México : Alfaomega., 2009. pág. 528. ISBN: 978-958-682-769-0.

—. **2009.** *Mantenimiento Planeación, ejecución y control.* Ciudad de México : Alfaomega, 2009. pág. 528. ISBN: 978-958-682-769-0.

—. **2009.** *Mantenimiento Planeación, ejecución y control.* Ciudad de México : Alfaomega., 2009. pág. 528. ISBN: 978-958-682-769-0.

—. **2009.** *Mantenimiento Planeación, ejecución y control.* Ciudad de México : Alfaomega, 2009. pág. 528. ISBN: 978-958-682-769-0.

—. **2009.** *Mantenimiento Planeación, ejecución y control.* Primera. Ciudad de México : Alfaomega., 2009. pág. 528. ISBN: 978-958-682-769-0.

—. **2009.** *Mantenimiento Planeación, ejecución y control.* Ciudad de México : Alfaomega, 2009. ISBN: 978-958-682-769-0.

—. **2009.** *Mantenimiento Planeación, ejecución y control.* Primera. Ciudad de México : Alfaomega, 2009. pág. 528. ISBN: 978-958-682-769-0.

—. **2009.** *Mantenimiento Planeación, ejecución y control*. Primera. Ciudad de México : Alfaomega., 2009. pág. 528. ISBN: 978-958-682-769-0.

—. **2009.** *Mantenimiento Planeación, ejecución y control*. Primera. Ciudad de México : Alfaomega., 2009. pág. 528. ISBN: 978-958-682-769-0.

**Nachlas, Joel.** **1995.** *Fiabilidad*. Madrid : Isdefe, 1995. ISBN:84-89338-07-8.

**Nachlas, Joel.** **1995.** Introducción-Definición 1.1. *Fiabilidad*. Primera. Madrid : Isdefe, 1995, 1.1.

**O'Connor, Patrick.** **2002.** *Practical Reliability Engineering*. Stevenage : Wiley-John Wiley and son., 2002. pág. p. 540. ISBN 0-470-84463-9.

**Ramakumar, Ramachandra.** **1996.** *Engineering Reliability. Fundamentals and applications*. New Jersey City. : Prentice-Hall Professional Technical, 1996. ISBN:0132767597.

**Relisoft@.** **2008.** <http://www.reliasoft.com/support/faq.htm>. *Reliasoft*. [En línea] 12 de Noviembre de 2008.

**Rojas, Arias, Jaime.** **1975.** *Intrioducción a la confiabilidad*. Bogota : Universidad de los Andes, 1975.

**Smith, Charles.** **1983.** *Introduction to Realibility in Design*. Malabar. : Robert E. Krieger Publishing Company., 1983. ISBN: 0898745535.

*Sobre el concepto de competitividad.* **Romo, David y Abdel, Guillermo.** **2005.** [ed.] Banco Nacional de Comercio Exterior. 3, México D. F. : Banco Nacional de Comercio Exterior., Marzo de 2005, Comercio Exterior, Vol. 55, págs. 200-214. Lo busque en la WEB y lo extraje.. ISSN: 0185-0601.

**U.S. Army.** **1972.** *AMCP 706-134 Maintainability Guide for Design*. Washington : U. S. Government Printing Office, 1972. ISBN: AMCP 706-134.

**Vallejo, Jaramillo Juan Santiago y Mora Gutiérrez, Luis Alberto (Director).** **2004.** *Desarrollo, validación, contraste y pronóstico del cálculo CMD - Trabajo de fin de carrera de Ingeniería Mecánica*. Medellín : Universidad EAFIT, 2004.