

SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FUTURO DE LOS INDICADORES CM Y
COSTOS DE MANTENIMIENTO EN UN CASO INDUSTRIAL

SARA RENGIFO ÁLVAREZ
ANA MARÍA VALENCIA ARANGO

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN

2009

SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FUTURO DE LOS INDICADORES CM Y
COSTOS DE MANTENIMIENTO EN UN CASO INDUSTRIAL

SARA RENGIFO ÁLVAREZ
ANA MARÍA VALENCIA ARANGO

Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Asesor
Juan Santiago Vallejo J.
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN

2009

Medellín, Octubre 23 de 2009

Agradecemos a nuestros padres por su apoyo incondicional en todos los proyectos y momentos importantes de nuestras vidas.

AGRADECIMIENTOS

AI INGENIERO JUAN SANTIAGO VALLEJO JARAMILLO por su colaboración incondicional como asesor de este proyecto.

AI DOCTOR INGENIERO LUIS ALBERTO MORA GUTIERREZ por brindarnos el apoyo necesario en los momentos requeridos.

A la empresa que nos proporcionó la información necesaria para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto de grado.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. CONCEPTOS CLAVES DE MANTENIMIENTO	22
1.1 OBJETIVO	22
1.2 INTRODUCCIÓN	22
1.3 DEFINICIÓN DEL MANTENIMIENTO	23
1.4 EVOLUCIÓN DEL MANTENIMIENTO	24
1.5 EL MANTENIMIENTO EN LA INDUSTRIA	25
1.5.1 El mantenimiento como función en la empresa.	26
1.5.2 El mantenimiento en la producción.	27
1.6 TIPOS DE MANTENIMIENTO	28
1.6.1 Mantenimiento correctivo.	30
1.6.2 Mantenimiento preventivo.	31
1.6.3 Mantenimiento predictivo.	32
1.7 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	35
2. DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES INDICADORES DE MANTENIMIENTO	36

2.1	OBJETIVO	36
2.2	INTRODUCCIÓN	36
2.3	DEFINICIÓN DE INDICADORES DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO .	37
2.4	DISTRIBUCIONES CM.....	45
2.4.1	Distribución normal.	48
2.4.2	Distribución log normal.	52
2.4.3	Distribución exponencial.	57
2.4.4	Distribución de Weibull.	61
2.5	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	65
3.	CRITERIOS RELEVANTES DE LA SIMULACIÓN Y SU UTILIZACIÓN EN MANTENIMIENTO.....	66
3.1	OBJETIVO	66
3.2	INTRODUCCIÓN.....	66
3.3	INICIOS DE LA SIMULACIÓN.....	67
3.4	DEFINICIÓN DE SIMULACIÓN.....	68
3.4.1.	Pasos para realizar un estudio de simulación.....	68
3.4.2.	Ventajas y desventajas en la simulación.	75
3.5	LA SIMULACIÓN EN EL MANTENIMIENTO	76

3.6	TEORÍA DE COLAS	78
3.6.1	Componentes de los sistemas de colas.....	79
3.6.2	Simulación de un sistema de colas.....	81
3.6.3	Simulación de un sistema de colas para un caso general de mantenimiento.	82
3.7	ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA CON SIMULACIÓN	84
3.8	MANTENIMIENTO CON <i>TPM (OEE)</i>	87
3.8.1	Etapas del indicador de efectividad global del equipo (<i>OEE, Overall Equipment Effectiveness</i>).	88
3.8.2	Cálculo de los factores del <i>OEE</i>	93
3.9	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	95
4.	PRINCIPALES CONCEPTOS DE INDICADORES DE COSTOS EN MANTENIMIENTO.....	96
4.1	OBJETIVO	96
4.2	INTRODUCCIÓN.....	96
4.3	COMPOSICIÓN DE COSTOS EN MANTENIMIENTO	97
4.4	RECOMENDACIONES PARA REDUCIR COSTOS EN MANTENIMIENTO	99
4.5	INDICADORES DE GESTIÓN DE COSTOS DE MANTENIMIENTO.....	102
4.5.1	Indicador de costos de mantenimiento por facturación.....	102

4.5.2	Indicador de costos de mantenimiento por producción.....	103
4.5.3	Indicador de costos de mantenimientos preventivos por mantenimientos totales.....	103
4.5.4	Indicador del costo de una hora de mantenimiento.....	104
4.5.5	Indicador del componente del costo de mantenimiento.....	104
4.5.6	Indicador de progreso en los esfuerzos de reducción de costos.....	105
4.5.7	Indicador de extensión del mantenimiento correctivo.....	105
4.5.8	Indicador de severidad de las reparaciones correctivas.....	106
4.5.9	Indicador de inmovilización en repuestos.....	106
4.6	CLASIFICACIÓN DE COSTOS DE MANTENIMIENTO.....	107
4.6.1	Costos variables.....	107
4.6.2	Costos financieros.....	108
4.6.3	Costos por falla.....	108
4.6.4	Costos fijos.....	108
4.7	COSTOS DE OPORTUNIDAD Y DE LUCRO CESANTE EN EL MANTENIMIENTO.....	110
4.8	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	111
5.	APLICACIÓN A UN CASO INDUSTRIAL.....	112
5.1	OBJETIVO.....	112

5.2	INTRODUCCIÓN.....	112
5.3	DESARROLLO	113
5.3.1	Supuestos del análisis de datos.	116
5.3.2	Pasos para determinar las distribuciones.	117
5.3.3	Pasos para determinar los costos.....	122
5.3.4	Pasos desarrollados para cumplir la etapa de simulación que se le aplica a los datos analizados.	124
5.4	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	126
6.	ANÁLISIS DE DATOS OBTENIDOS MEDIANTE LA SIMULACIÓN	127
6.1	OBJETIVO	127
6.2	INTRODUCCIÓN.....	127
6.3	DESARROLLO	127
6.3.1	Análisis de los indicadores con distribuciones.	127
6.3.2	Análisis de los tiempos promedios.....	131
6.3.3	Análisis de los costos de mantenimiento.	133
6.4	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	136
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	137
7.1	OBJETIVO.....	137

7.2	INTRODUCCIÓN.....	137
7.3	CONCLUSIONES DE LA METODOLOGÍA	137
7.4	CONCLUSIONES DE LOS DATOS FINALES	138
7.5	CONCLUSIONES DEL PROYECTO	140
7.6	RECOMENDACIONES.....	141
	BIBLIOGRAFÍA.....	142
	LISTA DE ANEXOS	149

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Relación de representación de las distribuciones	48
Tabla 2. Interpretación del parámetro β	62
Tabla 3. Pérdidas del <i>TPM</i> relacionadas con los factores del <i>OEE</i>	93
Tabla 4. Composición de los costos del mantenimiento	99
Tabla 5. Bloques de costos en el mantenimiento.....	109
Tabla 6. Base de datos del Equipo 8	115
Tabla 7. Tiempo entre fallas.....	118
Tabla 8. Duración de la parada.....	120
Tabla 9. Promedios de mantenimientos correctivos	123
Tabla 10. Promedios de mantenimientos preventivos	123
Tabla 11. Comparativo de confiabilidad en un tiempo de 1000 horas	129
Tabla 12. Comparativo de mantenibilidad en un tiempo de 2 horas	131
Tabla 13. Valores promedios de datos reales y simulados de tiempo entre fallas	132
Tabla 14. Valores promedios de datos reales y simulados de duración de parada	133

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Tiempo medio entre fallas	41
Ecuación 2. Tiempo medio para reparación	42
Ecuación 3. Disponibilidad	43
Ecuación 4. Disponibilidad inherente	43
Ecuación 5. Disponibilidad alcanzada.....	44
Ecuación 6. Disponibilidad operacional	45
Ecuación 7. Función de densidad	46
Ecuación 8. Función acumulada	46
Ecuación 9. Función de riesgo.....	47
Ecuación 10. Función de supervivencia.....	47
Ecuación 11. Función de densidad para una distribución normal	50
Ecuación 12. Función de densidad de la distribución log normal	56
Ecuación 13. Función de relación entre Poisson y exponencial.	58
Ecuación 14. Función de densidad de la distribución exponencial	59
Ecuación 15. Función de densidad de Weibull	63
Ecuación 16. Costos de mantenimiento por facturación	102

Ecuación 17. Costos de mantenimiento en relación a la producción	103
Ecuación 18. Costos de mantenimientos preventivos por mantenimientos totales	103
Ecuación 19. Costo de una hora de mantenimiento	104
Ecuación 20. Componente del costo de mantenimiento	104
Ecuación 21. Progreso en los esfuerzos de reducción de costos	105
Ecuación 22. Extensión del mantenimiento correctivo	105
Ecuación 23. Indicador de severidad de las reparaciones correctivas.....	106
Ecuación 24. Inmovilización en repuestos	107
Ecuación 25. Tiempo entre fallas en días	116
Ecuación 26. Duración de la parada	116

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Función de densidad para una distribución normal	51
Gráfica 2. Función de distribución acumulada para una distribución normal	52
Gráfica 3. Función de supervivencia para una distribución normal.....	52
Gráfica 4. Comparación entre una distribución normal y una log normal.....	54
Gráfica 5. Función de densidad para la distribución log normal.....	55
Gráfica 6. Función acumulada para la distribución log normal	56
Gráfica 7. Función de supervivencia para la distribución log normal	57
Gráfica 8. Funcion de densidad para la distribución exponencial	59
Gráfica 9. Funcion acumulada para la distribución exponencial	60
Gráfica 10. Funcion de supervivencia para la distribución exponencial.....	60
Gráfica 11. Función de densidad de para la distribución de Weibull.....	63
Gráfica 12. Función acumulada de fallas para la distribución de Weibull	64
Gráfica 13. Función de tasa de fallas para la distribución de Weibull	64
Gráfica 14. Ejemplo de mantenibilidad del equipo 8	121
Gráfica 15. Ejemplo de confiabilidad del equipo 11	121
Gráfica 16. Ejemplo de confiabilidad de datos reales y simulados del equipo 11	128

Gráfica 17. Ejemplo de mantenibilidad de datos reales y simulados del equipo 1 130

Gráfica 18. Costos de mantenimiento correctivo 134

Gráfica 19. Costos de mantenimiento preventivo 134

Gráfica 20. Costos totales acumulados 135

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Acciones planeadas y acciones imprevistas.....	30
Ilustración 2. Acciones preventivas.....	31
Ilustración 3. Acción predictiva.....	33
Ilustración 4. Pasos para desarrollar un estudio de simulación	69
Ilustración 5. Esquema de un sistema de colas	80
Ilustración 6. Esquema de los elementos en la teoría de colas	80
Ilustración 7. Simulación de un sistema de colas para un caso de mantenimiento	83
Ilustración 8. Efectividad global de un sistema	91
Ilustración 9. Metodología para determinar confiabilidad y mantenibilidad	114
Ilustración 10. Ejemplo de tiempo entre fallas del equipo 1, por medio del programa @RISK	119
Ilustración 11. Pasos para realizar el proceso de simulación	125

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo 1. Mantenibilidad del equipo 1	149
Anexo 2. Confiabilidad del equipo 1.....	149
Anexo 3. Mantenibilidad del equipo 2	150
Anexo 4. Confiabilidad del equipo 2.....	150
Anexo 5. Mantenibilidad del equipo 3	151
Anexo 6. Confiabilidad del equipo 3.....	151
Anexo 7. Mantenibilidad del equipo 4	152
Anexo 8. Confiabilidad del equipo 4.....	152
Anexo 9. Mantenibilidad del equipo 5	153
Anexo 10. Confiabilidad del equipo 5.....	153
Anexo 11. Mantenibilidad del equipo 6	154
Anexo 12. Confiabilidad del equipo 6.....	154
Anexo 13. Mantenibilidad del equipo 7	155
Anexo 14. Confiabilidad del equipo 7.....	155
Anexo 15. Mantenibilidad del equipo 8	156
Anexo 16. Confiabilidad del equipo 8.....	156

Anexo 17. Mantenibilidad del equipo 9	157
Anexo 18. Confiabilidad del equipo 9.....	157
Anexo 19. Mantenibilidad del equipo 10	158
Anexo 20. Confiabilidad del equipo 10.....	158
Anexo 21. Mantenibilidad del equipo 11	159
Anexo 22. Confiabilidad del equipo 11.....	159
Anexo 23. Mantenibilidad del equipo 12	160
Anexo 24. Confiabilidad del equipo 12.....	160
Anexo 25. Mantenibilidad del equipo 13	161
Anexo 26. Confiabilidad del equipo 13.....	161
Anexo 27. Mantenibilidad del equipo 14	162
Anexo 28. Confiabilidad del equipo 14.....	162
Anexo 29. Mantenibilidad del equipo 15	163
Anexo 30. Confiabilidad del equipo 15.....	163
Anexo 31. Mantenibilidad del equipo 16	164
Anexo 32. Confiabilidad del equipo 16.....	164
Anexo 33. Curva de Davies	165

INTRODUCCIÓN

El proyecto sirve al sector industrial y al grupo de investigación GEMI de la Universidad EAFIT, éste busca desarrollar investigaciones exploratorias, descriptivas y estadísticas sobre fenómenos directos o asociados a la gestión y operación de mantenimiento industrial, empresarial o comercial sobre equipos de generación de servicios, siguiendo normas y metodologías internacionales basadas en Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad (EAFIT@¹, 2008).

El desarrollo del proyecto consta del conocimiento teórico acerca de la simulación en mantenimiento y los conceptos fundamentales de los indicadores CMD, por medio de referencias bibliográficas, libros, internet, entre otros, para proporcionar conceptos necesarios y construir las bases sobre las cuales se despliega el proyecto.

Se realizan visitas técnicas que enriquecen de una u otra forma la concepción inicial del proyecto y se hace un reconocimiento integral del entorno industrial, lo que significa, saber a quién va dirigido el proyecto y en qué grado será benéfico llevarlo a cabo.

¹ @ el símbolo de arroba se usa para denotar que la fuente es tomada de Internet y se clasifica en forma detallada en la Bibliografía de Internet.

Las simulaciones permiten una mejor visualización de los problemas que se analizan y ayudan a tomar decisiones acertadas de forma inmediata, además de estas y otras ventajas el proyecto combina las virtudes de la simulación con las de los indicadores de gestión y ofrece un completo diagnóstico de análisis CMD.

El desarrollo de la implementación de los indicadores de gestión, indicadores de costos y la simulación de estos en el campo de mantenimiento, favorece en alto grado al grupo de investigación en la línea de Ingeniería de mantenimiento en fabricas - Tero tecnología, mas puntualmente para el proyecto “Monitoreo y Confrontación Valores Parámetros CMD Futuros Clásico versus Series Temporales” (Vallejo, 2008).

El proyecto contiene la recolección de datos, los cuales son obtenidos mediante un seguimiento con fines investigativos. Estos datos son analizados y simulados, para llegar a una etapa final donde se entregan los resultados en un pronóstico de los datos para cumplir el objetivo general el cual consiste en calcular el comportamiento futuro de parámetros CM mediante simulación de los indicadores históricos.

Como puente para el desarrollo del proyecto, se incluye una investigación de indicadores CMD, indicadores de costos de mantenimiento y se complementa con el tema de simulación.

No se alcanza una etapa de seguimiento a los equipos para la obtención de datos, así como tampoco se incluyen instrucciones de programación.

1. CONCEPTOS CLAVES DE MANTENIMIENTO

1.1 OBJETIVO

Identificar conceptos claves de mantenimiento que sirvan de base en el desarrollo del proyecto.

1.2 INTRODUCCIÓN

El mantenimiento es fundamental para la vida útil de una máquina, éste se requiere realizar periódicamente para poder detectar a tiempo cualquier indicio de fallas o daños en los componentes de una máquina o una instalación.

El mantenimiento involucra diferentes áreas operativas dentro de una empresa, donde todas se centran en el buen estado de las máquinas, de esta manera las personas de mantenimiento brindan apoyo logístico para mantener la función de mantenimiento y garantizar los elementos para que haya disponibilidad de las máquinas, equipos e instalaciones.

El objetivo buscado por el mantenimiento es contar con instalaciones en óptimas condiciones en todo momento, para asegurar una disponibilidad total del sistema en todo su rango de desempeño, lo cual está basado en la carencia de errores y fallas (Mendiburu Diaz@, 1997).

El mantenimiento brinda un desempeño continuo y una operación bajo las mejores condiciones técnicas, sin importar las condiciones externas (ruido, polvo,

humedad, calor, etc.) del ambiente al cual esté sometido el sistema.

Conjuntamente, el mantenimiento debe estar destinado a:

- Optimizar la producción del sistema.
- Reducir los costos por averías.
- Disminuir el gasto por nuevos equipos.
- Maximizar la vida útil de los equipos (Mendiburu Diaz@, 1997).

1.3 DEFINICIÓN DEL MANTENIMIENTO

El mantenimiento es el proceso estratégico e instrumental de detección de las condiciones, síntomas y estado de los equipos e instalaciones; los cuales deben tener cuidados para su funcionamiento y conservación, de este modo se logra alargar el ciclo de vida e incrementar la confiabilidad para prevenir fallas. Al mismo tiempo, se busca disponibilidad y mayor eficiencia.

Esta definición encamina al mantenimiento, hacia la permanente optimización de la disponibilidad de las instalaciones o equipos y de los recursos humanos, además de la disminución de los costos de mantenimiento y de la maximización de la vida de la máquina.

El mantenimiento es la prolongación de la vida útil de la maquinaria, incluye el deterioro de la calidad del producto o causas de riesgos en la seguridad industrial; puede también ocurrir que el mantenimiento represente un elevado costo que compensa los gastos que causa el paro de las máquinas (Pelaez, 1972,1).

La definición de mantenimiento según Rey Sacristán, es el conjunto armónico de las técnicas utilizadas para asegurar el adecuado funcionamiento de la maquinaria productiva y las instalaciones. “En una línea de producción es el conjunto de disposiciones de orden técnico, medios y actuaciones que garantizan la máxima disponibilidad y la eficiencia en el cumplimiento de los planes de producción; su eficacia está asociada con la disponibilidad y la confiabilidad con el mínimo costo” (Rey Sacristán, 2001, 1).

1.4 EVOLUCIÓN DEL MANTENIMIENTO

En la industria, el mantenimiento se considera desde dos puntos de vista, el primero es cuando las cosas marchan bien, lo que hace que la labor pase inadvertida y el segundo es cuando las rutinas no resultan efectivas, y por lo tanto lo tachan de ineficiente y costoso.

El mantenimiento tiene tres etapas de evolución:

- Etapa 1. Mantenimiento por rotura: hasta los años cincuenta, la industria no estaba mecanizada y las paradas de los equipo no tenían mucha importancia, esto se debe a que las máquinas eran sencillas y fáciles de reparar.
- Etapa 2. Mantenimiento planificado: la creciente automatización de los procesos productivos y su complejo mantenimiento, conlleva al concepto de mantenimiento preventivo, esto fue entre los años cincuenta y sesenta, de ahí en adelante el concepto de mantenimiento no era únicamente reparar los equipos sino también planificar y mejorar la productividad. De esta manera el

mantenimiento planificado engloba el mantenimiento correctivo, preventivo, predictivo y modificativo.

- Etapa 3. Mantenimiento productivo Total (*TPM*): “el *TPM* fue desarrollado por primera vez en 1969. A diferencia del mantenimiento planeado, el *TPM* evolucionó el mantenimiento y realizó mejoras en los equipos con la implicación de toda la organización administrativa” (Rey Sacristán, 2001, 41-43).

1.5 EL MANTENIMIENTO EN LA INDUSTRIA

Los servicios que presta mantenimiento se encuentran dentro de la gestión de una empresa en función de la producción y sin estos difícilmente se puede obtener un producto, además, es importante recordar que todo proceso industrial tiene por meta emplear el capital mínimo en instalaciones, maquinaria y mano de obra, pero responde a la calidad y cantidad deseada (27).

El mantener la maquinaria e instalaciones en perfectas condiciones de funcionamiento, proporciona una alta productividad siempre y cuando se integre mantenimiento con personal calificado.

Asimismo, el fin del mantenimiento es conservar la planta, los equipo, los edificios, los servicios y las instalaciones en condiciones de cumplir con la función para la cual son proyectados con la capacidad y la calidad especificadas, los cuales son utilizados en condiciones de seguridad y economía de acuerdo a un nivel de ocupación y a un programa de uso definidos por los requerimientos de producción.

1.5.1 El mantenimiento como función en la empresa.

El mantenimiento en una empresa representa una inversión que a mediano y largo plazo trae rentabilidad, no solo para el empresario, a quien esta inversión se le devuelve en mejoras en la producción, sino también el ahorro que representa tener trabajadores sanos y bajos índices de accidentalidad.

El nivel que ocupa mantenimiento en el organigrama en una industria, influye poco o nada en la función y resultados de los servicios que presta, cuando las relaciones entre el responsable de mantenimiento y los responsables de otros servicios, a los que atiende son buenas, aquel no necesita un nivel de autoridad normal y ocupa en el organigrama la misma altura que estos (34).

El objetivo de un departamento de mantenimiento es conservar los equipos e instalaciones de tal manera que las fallas imprevistas sean mínimas, es responsabilidad de servicio de ingeniería y mantenimiento familiarizarse con todas las cuestiones que puedan afectarlos.

La cultura que se maneja en una empresa en cuanto al concepto que se tiene acerca de mantenimiento, es posible modernizarla con la creación de equipos multidisciplinarios que gestionen las mejoras de los procesos y la confiabilidad, de igual forma hay que evitar en lo posible entrar a la zona de envejecimiento de la curva de la bañera de Davis², también el orientar las funciones hacia la prevención

² Curva de la bañera de Davis (ver anexo 33): muestra la evolución en el tiempo mediante tres zonas, mortalidad infantil, madurez o vida útil y envejecimiento (Mora Gutierrez, 2006,79).

y predicción de averías, además, hay que integrar la planificación del mantenimiento en la de la producción, para programar todo tipo de paradas (102).

1.5.2 El mantenimiento en la producción.

El servicio de mantenimiento hace parte integral de todo el equipo de producción, este tipo de organización conduce a una política apropiada para industrias con bajos costos de mantenimiento y en las que la complejidad de la función mantener no justifica mayores desarrollos organizacionales.

La estrategia de una línea de producción que permita garantizar que las máquinas e instalaciones puedan desarrollar el trabajo que tengan previsto en un determinado plan de producción consiste en poner en marcha actividades de mantenimiento que brindan una orientación a reducir lo mínimo posible la indisponibilidad de estos. La disponibilidad y confiabilidad constituyen dos índices básicos para medir la eficacia del mantenimiento; pero para que el mantenimiento pueda calificarse de eficiente es preciso, que los costos involucrados sean lo más reducido posibles (29).

Los tiempos para un trabajo de producción pueden ser difíciles de medir, y aún más si se trata de tiempos de trabajo de mantenimiento. En producción las operaciones son repetitivas, lo que facilita observar los movimientos y medir los tiempos, se puede delimitar bien el final de una operación y el principio de la siguiente, mientras que en mantenimiento es más complejo, ya que las operaciones no suelen repetirse y hay pocas que se presentan de nuevo en el mismo orden (Ludwig Swärd, 1961, 225).

1.6 TIPOS DE MANTENIMIENTO

El mantenimiento comprende diferentes modos de realizar los trabajos, que pueden ir desde reparar tan pronto se inicie un desgaste, pero antes de llegar a un peligro de parada o problema de calidad, hasta el extremo opuesto que sería esperar a que el desgaste o anomalía traiga consigo la parada final del equipo, o repercuta en la calidad del producto terminado (Rey Sacristán, 2001, 46).

La planificación de una organización de mantenimiento considera necesarios ciertos factores, tales como: clase de equipo a mantener, turnos de trabajo, situación geográfica, tamaño de la industria, campo de acción asignado al mantenimiento, nivel de formación (cualificación y experiencia del personal de mantenimiento), niveles de intervención; esto asegura que en todo momento que se requiera hacer mantenimiento, en el almacén siempre estarán las piezas necesarias para dicha intervención, además del personal adecuado (48).

La prevención de las condiciones degradadas de una máquina, no sólo hace que se disminuya el costo de reparaciones, sino que mantiene el rendimiento de la maquinaria en un nivel adecuado en cuanto a cantidad y calidad. De esta manera, los conceptos básicos de las operaciones de prevención, corrección y predicción, hoy en día, destacan diferentes tipos de mantenimiento que han evolucionado.

La aplicación de los diferentes tipos de mantenimiento se define como una mezcla de conceptos, aplicada durante la intervención que se realiza sobre la maquinaria, para esto, es importante observar el comportamiento del equipo y elaborar un

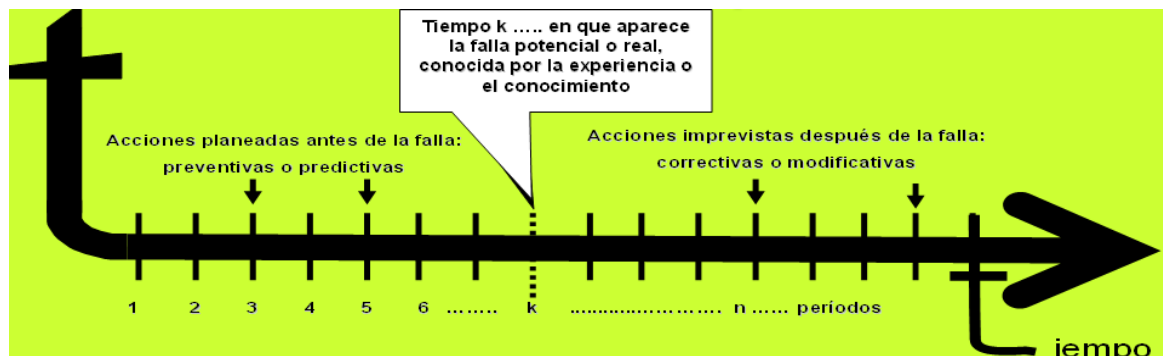
historial de averías y paradas. En este histórico, el dato más importante es el tiempo de buen funcionamiento, ya que es la base sobre la que se realiza el tipo de mantenimiento que se necesita ejecutar.

El equipo de mantenimiento siempre busca determinar el tiempo en que aparece la falla potencial o real, conocida por la experiencia. Las acciones llevadas a cabo antes que ocurra la falla son planeadas y pueden ser de tipo preventivas y predictivas, mientras que las acciones imprevistas ocurridas después de la falla son de tipo correctivo o modificativo (Mora G., 2007).

La planificación de las actividades de mantenimiento se basa en los principios de control y planificación de la producción, la cual debe estar fundamentada en hechos para garantizar una mayor fiabilidad, para de esta manera, tener en cuenta el estado actual del equipo de producción, la cantidad esperada de producción, el uso y conservación del equipo, demanda futura, estadísticas de mantenimiento, política de mantenimiento entre otros (Ludwig Swärd, 1961, 68).

Planear es una estrategia creada en la mente del ser humano y se refiere a la acción y efecto de planear un modelo sistemático de una actuación, que se elabora anticipadamente para dirigirla y encauzarla, mientras que la programación, es un sustantivo, de carácter real, que se encarga de preparar ciertas máquinas por anticipado para que empiecen a funcionar en el momento previsto (Ver ilustración 1), (Mora Gutiérrez., 2008, 22).

Ilustración 1. Acciones planeadas y acciones imprevistas



Fuente: Mora Gutiérrez., 2008, 22.

1.6.1 Mantenimiento correctivo.

Es aquel que se ocupa de la reparación una vez se ha producido la falla y el paro súbito de la máquina o instalación (Molina, 1997). El mantenimiento correctivo responde a una solicitud de reparación que opera sobre una base no planificada.

El mantenimiento correctivo no se puede eliminar en su totalidad, debido a que con una buena gestión se extraerán conclusiones de cada parada para realizar la reparación de manera definitiva, ya sea en el momento que ocurre la falla o cuando se programa un paro, para que esta no se repita.

Al momento de presentarse una situación que requiera la intervención de mantenimiento correctivo, es importante que el personal que se envíe a efectuar este trabajo lleve consigo las herramientas y utensilios necesarios. Debe también instruírsele acerca del trabajo a realizar y del método a emplear. El almacén de herramientas debe guardar los repuestos especiales que no son de uso frecuente, que son útiles para estos casos de emergencia.

El mantenimiento correctivo cuenta con algunas desventajas como: las paradas y daños imprevisibles en la producción, que afectan a la planificación de manera incontrolada, de igual forma, se suele producir una baja calidad en las reparaciones debido a la rapidez en la intervención y a la prioridad de reponer el daño en el menor tiempo posible, por lo que produce un hábito a trabajar defectuosamente, sensación de insatisfacción e impotencia, ya que este tipo de intervenciones a menudo generan otras al cabo del tiempo por mala reparación y por lo tanto será difícil romper con esta inercia (Molina@, 1997).

1.6.2 Mantenimiento preventivo.

Comprende todas las acciones sobre revisiones, modificaciones y mejoras, dirigidas a evitar averías. La acción sistemática de revisar periódicamente, la podemos definir como inspeccionar, controlar y reparar antes que se produzca la avería. También se puede decir que el mantenimiento preventivo consiste en reparar cuando la maquinaria o instalación están aún, en cuanto a seguridad, calidad y desgaste, dentro de límites aceptables.

Ilustración 2. Acciones preventivas



Fuente: Mora Gutierrez, 2008, 264.

El primer paso a dar frente a la aparición de un disfuncionamiento, es prever un medio que disminuya el número de presencias de éste, y esto solo se logra mediante la implementación de un mantenimiento preventivo o incluso, en otros casos se puede pensar en aplicar un mantenimiento modificativo.

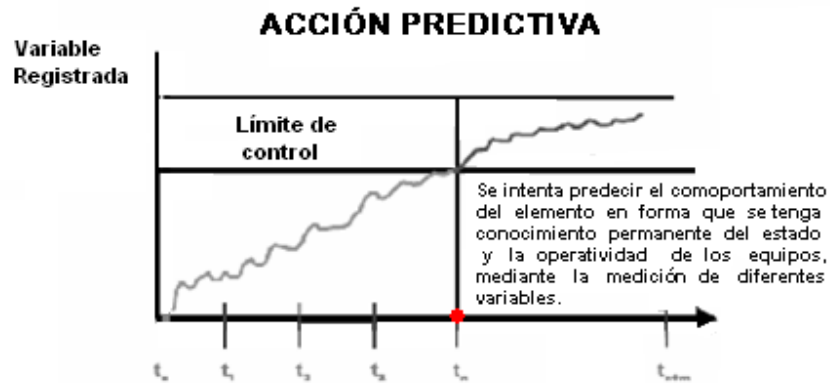
La correcta aplicación de este tipo de mantenimiento, incluye un estudio previo o estimación de la vida de los distintos elementos susceptibles a desgastes, o que conducen a deterioros o disfuncionamientos de la máquina o grupo de máquinas consideradas como fase previa a la planificación de las operaciones y tipos de mantenimiento (Rey Sacristán, 2001,46).

El mantenimiento preventivo ideal sería aquel que por un conocimiento completo del historial de todas y cada una de las piezas que sufren desgastes, permita construir un programa de intervención preventiva de reposición de aquellas. De modo tal que una pieza sea reemplazada antes de su desgaste total o rotura, solo de esta forma se logra que las averías desaparezcan por completo (47).

1.6.3 Mantenimiento predictivo.

El objetivo final de este tipo de mantenimiento, es asegurar el correcto funcionamiento de las máquinas críticas, a través de la inspección del estado del equipo, por vigilancia continua de los niveles correspondientes a los parámetros indicadores de su condición.

Ilustración 3. Acción predictiva



Fuente: Mora Gutierrez, 2008, 265.

Esta metodología permite seguir con precisión el estado de la maquinaria, así como la evolución de los síntomas de falla, con el fin de:

- Conocer con gran precisión el momento en que se va a producir la avería o falla.
- Alargar el máximo posible la vida útil de las piezas y conjuntos, a fin de disminuir el costo de mantenimiento.

La modernidad en la tecnología, favorece directamente a este tipo de mantenimiento, además, proporciona una serie de métodos que permiten evaluar externamente las condiciones de funcionamiento de la maquinaria a través del control y evolución de ciertos parámetros, como por ejemplo en presiones de engrase, vibraciones, temperaturas, etc.

La importancia de la disciplina del análisis que el mantenimiento predictivo utiliza como herramienta, así como los avances de la tecnología de medición y los análisis dinámicos de señales, permiten detectar con precisión desde desgastes de cojinetes antifricción o de rodamientos, hasta poder darse cuenta de qué diente de un piñón es el que está dañado.

El mantenimiento predictivo presupone la monitorización de la instalación, máquina o equipo controlado, es decir, la instalación de sensores para la captación de una señal premonitoria, puede ser de vibración, ruido, temperatura, presión, análisis de partículas en lubricación, etc. La señal captada debe ser posteriormente analizada e interpretada para poder tomar decisiones si procede, comparándola con las señales correspondientes a situaciones conocidas de marcha ideal.

El hecho de requerir personal especializado para las intervenciones de variables más complejas, como por ejemplo las vibraciones, hace que en muchas empresas consideren que estas labores puedan ser asumidas por personas con conocimientos tradicionales, lo que trae consigo que el mantenimiento predictivo quede reducido a una inspección rutinaria, en la cual la eficiencia de este mantenimiento no queda bien evaluada para este tipo de situaciones.

Existen otros tipos de mantenimientos como el mantenimiento modificativo, que suele incluirse dentro del mantenimiento preventivo e intenta modificar las máquinas eliminando las causas de la avería. Pero los más importantes son el

mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo.

1.7 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

La labor de mantenimiento es fundamental para la vida útil de una máquina, con esto se detecta a tiempo cualquier indicio de fallas o daños en los componentes de una máquina o una instalación.

Hoy en día las diferentes áreas operativas de una empresa, brindan apoyo logístico para mantener la función de mantenimiento y garantizar los elementos para aumentar la disponibilidad y confiabilidad de las máquinas e instalaciones.

Las técnicas que se aplican a los diferentes tipos de mantenimiento, son implementadas por personas con un nivel de conocimiento, de modo tal que la técnica empleada en una determinada empresa sea apropiada, no solo para mejorar los tiempos de vida útil de los equipos, maquinarias e instalaciones, sino también se tiene en cuenta una reducción en los costos.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES INDICADORES DE MANTENIMIENTO

2.1 OBJETIVO

Describir los principales indicadores de mantenimiento relacionados con los tiempos de operación y parada de los equipos y que sirven para su soporte histórico.

2.2 INTRODUCCIÓN

Los indicadores permiten estimar el comportamiento de un proceso de manera cuantitativa. Actualmente, obtener el control sobre toda la gestión del área de mantenimiento es importante para dirigir las acciones al logro de las metas de la empresa.

La validación de los indicadores elegidos para la simulación de estos en casos industriales, se realiza mediante modelos de distribución. Para el cumplimiento de estos objetivos, se toma como apoyo el uso de las técnicas de mantenimiento, mediante distribuciones como de WEIBULL, NORMAL, EXPONENCIAL y LOGNORMAL.

Las distribuciones son aquellas que representan el resultado esperado que arrojan las variables. Al contar con un comportamiento predecible de dichas variables, se puede adelantar a los hechos para llegar a una toma de decisiones y así reducir

condiciones de incertidumbre.

Los datos considerados en el modelo están revisados y actualizados respecto a los tiempos de funcionamiento y de paro de las máquinas, para esto se tienen en cuenta el tiempo de funcionamiento del equipo, el tiempo en que tarda en repararse un equipo después de fallas, el tiempo medio entre fallas y otros que a éstos le competen.

2.3 DEFINICIÓN DE INDICADORES DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO

Un indicador de gestión es la expresión cuantitativa del comportamiento y desempeño de un proceso, cuya magnitud, al ser comparada con algún nivel de referencia, señala una desviación sobre la cual se toman acciones correctivas, preventivas y de mejora según el caso (Jaramillo@,2009).

Los indicadores de gestión representan un instrumento de control para monitorear un proceso, función o equipo, en un momento estipulado, para determinar la evaluación de su estado que puede medirse con parámetros orientados a la toma de decisiones, produciéndose una mejora continua del proceso de mantenimiento. Asimismo, se establecen límites de control y no conformidades, con el fin de, analizar sus causas e implantar soluciones, para establecer acciones correctivas sin demora y en forma oportuna.

Las características principales de los indicadores deben ser la facilidad de medición de los datos implicados en el indicador, la rapidez de obtención, la frecuencia de obtención adecuada, la claridad de la información que ofrece, el interés de la información que proporciona, la posibilidad de analizar gráficamente la evolución y la fácil definición del valor óptimo o de referencia y límites, para garantizar su utilidad.

Al mismo tiempo, estos tienen como fin motivar al personal, en cuanto a la realización de su trabajo y desempeño, además de, velar por el cumplimiento de los objetivos estratégicos del proceso, donde se involucran los procesos operativos y administrativos de una organización (Pauro@,2009).

Existen muchos indicadores de gestión, pero es necesario elegir los más importantes y generales, que permitan la supervisión del proceso de mantenimiento. Los tres indicadores básicos que se llevan a cabo mediante una evaluación son: Confiabilidad, Mantenibilidad, Disponibilidad (Pelaez, 1972, 45). Estos indicadores CMD controlan la gestión y operación integral del mantenimiento (Mora Gutierrez, 2008, 69).

Un sistema de procesamiento es aquel que convierte datos en información para tomar decisiones. Decidir si se realizan o no los cambios o determinar algún aspecto concreto, se define con una serie de parámetros que permiten evaluar los resultados que se obtienen en el área de mantenimiento. Es decir: a partir de unos datos, el sistema de procesamiento devuelve una serie de indicadores, los cuales

son la base para tomar decisiones sobre la evolución del mantenimiento.

La definición de los indicadores se realiza con base en la eliminación de aquellos que no aporten información. Hay que tener cuidado en la elección de éstos, pues se corre el riesgo de utilizarlos como una serie de números sin importancia. Por ejemplo, si se elige la disponibilidad de equipos como un indicador, y se listan todas las paradas de cada uno de los equipos de la planta, la fecha, hora en que han ocurrido y su duración, la lista resultante serán datos, pues tal y como se presenta no sirve para tomar decisiones de ella.

La información para obtener indicadores se compone de los tiempos de paro y que ésta sea específica (por líneas, áreas, zonas, etc.), estos datos se procesan y se obtiene la disponibilidad de una de las líneas, áreas o zonas en su conjunto. El nuevo listado contendrá información, la cual permite, tras un análisis, tomar decisiones acertadas sobre las actuaciones a realizar para mejorar los resultados.

Además de conocer el valor del indicador, también se conoce su evolución, para que de esta manera se expongan los valores obtenidos de cada índice y conocer si la situación, por medio de una comparación de valores pasados (meses o años anteriores) y actuales para determinar si es un progreso o retraso para el proceso. Igualmente, se fijan objetivos para cada uno de los índices y se analiza si el resultado es bueno o malo (García@, 2008).

2.3.1 Confiabilidad.

Es la probabilidad que un equipo, sistema o subsistema no falle y desempeñe satisfactoriamente las funciones para las cuales fue diseñado, bajo las condiciones dadas durante el periodo de tiempo específico.

La importancia de la confiabilidad radica en que define cuantitativamente el perfil de funcionalidad de un elemento, para generar información probabilística que permite ayudar en el momento de la toma de decisiones.

La confiabilidad se debe aumentar con el fin de evitar los efectos negativos de un inadecuado servicio de mantenimiento y para suplir las necesidades del mercado interno, debido a que es importante que los equipos tengan largos periodos de operación, para evitar pérdidas de tiempo, altos costos, mayor número de repuestos y riesgos en la vida de las personas (Garcia, 2005, 23).

Teniendo presente que la confiabilidad es una medida estadística, se tiene en cuenta el tiempo entre fallas. A continuación se define el concepto de tiempo medio entre fallas y su formulación matemática.

- Tiempo medio entre fallas ($MTBF^3$): indica el intervalo de tiempo más probable entre el fin de una falla y la aparición de una nueva falla, lo que indica, el tiempo transcurrido hasta la llegada del evento “falla”.

³ *MTBF: Mean Time Between Failures*

Ecuación 1. Tiempo medio entre fallas

$$MTBF = \frac{\sum TBF}{\text{Número_de_fallas}}$$

Donde:

- *TBF*, Tiempo entre fallas.

Fuente: Mora Gutierrez, 2008, 59.

Mientras mayor sea su valor, mayor es la confiabilidad del equipo y menor el número de paradas.

2.3.2 Mantenibilidad.

Es la probabilidad que un equipo o sistema sea restituido a un estado de funcionamiento normal, luego de la aparición de una falla, y cuando el mantenimiento es realizado, al nivel deseado de confianza, con el personal especificado, las habilidades necesarias, el equipo indicado, los datos técnicos, manuales de operación y mantenimiento, el departamento de soporte de mantenimiento y bajo condiciones ambientales especificadas (Garcia, 2005, 25).

Una forma clara para medir la mantenibilidad, es tener en cuenta todos los tiempos en reparaciones, restauraciones o realización de tareas relacionadas con equipos o sistemas. Además, se debe tener en cuenta, los hechos previos que ocurren antes de haber alcanzado el estado de normalidad: el diseño, operación, habilidades de los operarios, modificaciones realizadas, reparaciones anteriores, capacidad de operación, el entorno, entre otros (Mora, 2008, 75).

A continuación se define el concepto de tiempo medio entre para reparación y su formulación matemática.

- Tiempo medio para reparación ($MTTR^4$): indica el tiempo promedio para restaurar la función de un equipo o proceso, después de una falla funcional, incluye tiempo para analizar y diagnosticar la falla, tiempo de planeación.

Ecuación 2. Tiempo medio para reparación

$$MTTR = \frac{\sum TTR}{\text{Número_de_fallas}}$$

Donde:

- TTR , Tiempo para reparación.

Fuente: Mora, 2008, 75.

2.3.3 Disponibilidad.

Es la probabilidad que indica que parte del tiempo el equipo está dispuesto para ser utilizado y cumplir su misión en unas condiciones dadas.

La disponibilidad es una medida importante y útil para la toma de decisiones a la hora de elegir un equipo entre varias alternativas, por eso es necesario utilizar información que abarque todas las características relacionadas al perfil de funcionalidad del equipo o sistema.

⁴ $MTTR$: Mean Time To Repair

Ecuación 3. Disponibilidad

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Tiempo}_{\text{dispositivo}_{\text{opera}_{\text{correctamente}}}}}{\text{Tiempo}_{\text{dispositivo}_{\text{pueda}_{\text{operar}}}}$$

Fuente: Mora, 2008, 61.

Para hablar de la disponibilidad es importante mencionar los tipos de disponibilidad que existen. A continuación se mencionan tres tipos de disponibilidades.

- Disponibilidad inherente: es la probabilidad que determina que el sistema opere satisfactoriamente, en cualquier momento bajo condiciones establecidas de operación y en un entorno ideal, lo que conlleva a contar, con personal adecuado, repuestos, herramientas, equipos, etc., sin considerar ninguna demora logística o administrativa (Mora, 2008, 61). Puede ser considerada como un parámetro de diseño, además, depende directamente de *MTTR* y *MTBF* y está dada por:

Ecuación 4. Disponibilidad inherente

$$A_{INH} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Donde:

- *MTBF*, es el tiempo medio entre fallas.
- *MTTR*, es el tiempo medio para hacer reparación.

Fuente: Mora, 2008, 61.

- Disponibilidad alcanzada: es la probabilidad que el sistema opera satisfactoriamente, cuando sea requerido en cualquier tiempo bajo las condiciones de operación especificadas y en un entorno ideal de soporte logístico, sin considerar ningún retraso logístico o administrativo pero involucra en sus cálculos tiempos de las actividades de mantenimiento planeado (Mora, 2008, 62).

Ecuación 5. Disponibilidad alcanzada

$$A_A = \frac{MTBM}{MTBM + M}$$

Donde:

- *MTBM*, es el tiempo medio entre mantenimientos (incluye mantenimientos planeados y no planeados).
- *M*, es tiempo medio para hacer mantenimiento (tanto para mantenimientos planeados y no planeados).

Fuente: Mora, 2008, 62.

- Disponibilidad operacional: es la probabilidad que un sistema opere bien en cualquier tiempo bajo las condiciones de operación especificadas en un entorno real de soportes logísticos, dentro de los tiempos de mantenimiento, los tiempos causados por los retrasos logísticos administrativos. Incluye el mantenimiento programado y no programado (Mora, 2008, 64).

Ecuación 6. Disponibilidad operacional

$$A_o = \frac{MTBM}{MTBM + M'}$$

Donde:

- M' , es tiempo medio para hacer mantenimiento (tanto para mantenimientos planeados y no planeados, además de, la sumatoria de los tiempos logísticos de daños).

Fuente: Mora, 2008, 64.

2.4 DISTRIBUCIONES CM

Un sistema de distribución estadístico permite integrar los indicadores de gestión con otros indicadores de mantenimiento, para brindar una información adecuada acerca del manejo de los equipos.

Cuando se dispone de un sistema de distribución, el cálculo de los indicadores es rápido. Se automatizan los cálculos y se genera un informe que los contenga todos, de manera periódica.

Las distribuciones de probabilidad son idealizaciones de los polígonos de frecuencias. En el caso de una variable estadística continua se considera el histograma de frecuencias relativas, y se comprueba que al aumentar el número de datos y el número de clases el histograma tiende a estabilizarse y llega a convertirse su perfil en la gráfica de una función.

Como tema introductorio a las distribuciones, es necesario tener en cuenta los conceptos que describen las distribuciones, como función de densidad, función acumulada, función de tasa de fallos y función de supervivencia. A continuación se muestran sus respectivas definiciones.

- Función de densidad $f(t)$. La función de densidad es la derivada de la función de supervivencia $S(t)$ (concepto que se define mas adelante), simboliza la frecuencia relativa que un elemento alcance un tiempo t de vida (Leemis, 1995,48).

Ecuación 7. Función de densidad

$$f(t) = -S'(t)$$

Fuente: Leemis, 1995, 48

- Función acumulada $F(t)$. La función de distribución acumulada es la probabilidad que la falla ocurra antes o en el instante t (Lejarza@, 1999). Consiste en una lista de eventos asociados a la probabilidad que ocurra cada uno de ellos más la probabilidad que ocurran los anteriores (Sandoval Hernandez@, 2004).

Ecuación 8. Función acumulada

$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau, t \geq 0$$

Fuente: Leemis, 1995,53

- Función de riesgo o de tasa de fallas $h(t)$. Es una medida de predisposición de falla como una función del tiempo, es el riesgo en cada instante t y la última falla ocurre en el tiempo cero (Estévez Pérez@, y otros, 2001).

Ecuación 9. Función de riesgo

$$h(t) = \frac{f(t)}{S(t)}, t \geq 0$$

Fuente: Leemis, 1995,49

- Función de supervivencia $S(t)$. Cuando la variable aleatoria es el tiempo que transcurre hasta que se produce la falla: “la función de supervivencia es la probabilidad que la falla ocurra después de transcurrido el tiempo t ; por lo tanto, es la probabilidad que el elemento, la pieza o el ser considerado sobreviva al tiempo t ” (Lejarza@, 1999).

Ecuación 10. Función de supervivencia

$$S(X) = P(x > X) = 1 - F(X)$$

Fuente: Lejarza@, 1999.

Las distribuciones se representan de diferentes maneras, en general mediante las funciones de supervivencia, acumulada, de densidad de fallas y la función de tasa de fallas o de riesgo (Vallejo Jaramillo, 2004, 50).

La Tabla 1 muestra la relación matemática entre las distribuciones para pasar de una función a otra.

Tabla 1. Relación de representación de las distribuciones

	$f(t)$	$S(t)$	$h(t)$	$F(t)$
$f(t)$	--	$\int_t^\infty f(\tau)d\tau$	$\frac{f(t)}{\int_t^\infty f(\tau)d\tau}$	$\int_0^t f(\tau)d\tau$
$S(t)$	$-S'(t)$	--	$\frac{-S'(t)}{S(t)}$	$1-S(t)$
$h(t)$	$h(t)e^{-\int_0^t h(\tau)d\tau}$	$e^{-\int_0^t h(\tau)d\tau}$	--	$1-e^{-\int_0^t h(\tau)d\tau}$
$F(t)$	$F'(t)$	$1-F(t)$	$\frac{F'(t)}{1-F(t)}$	--

Fuente: Leemis, 1995, 55

2.4.1 Distribución normal.

La distribución normal, también llamada distribución de Gauss o distribución gaussiana, es la distribución de probabilidad que aparece en estadística y teoría de probabilidades (Gamboa@, 2006).

Esta es una distribución continua que se presenta cuando la vida útil de los componentes se ve afectada desde de un comienzo por el desgaste, sirve para describir los fenómenos de envejecimiento de equipos, modelos de fatiga y

fenómenos naturales, en esta distribución las fallas se distribuyen de forma simétrica alrededor de la vida media (Mora Gutierrez, 2008, 113).

Es el modelo continuo más utilizado en estadística, dado que muchos fenómenos tienen un comportamiento acampanado, sin embargo, hay que identificar primero si los datos si se comportan como tal, lo que significa que, se debe conocer si los datos son aproximadamente acampanados, para ello se disponen de procedimientos descriptivos como, el histograma, comparar las medidas de posición relevantes (media, mediana y moda) (McDaniel, y otros, 1999, 439-440).

Propiedades de la distribución normal

- Tiene forma de campana y presenta una sola moda que es una medida de la tendencia central, es el valor específico que ocurre con mayor frecuencia.
- La distribución normal tiene simetría en torno a la media. Esto es otra manera de decir que no está desviada y que sus tres medidas de tendencia central (media, mediana y moda) son todas iguales.
- Se define de manera única por su media y su desviación estándar.
- El área total bajo una curva normal tiene valor de uno, lo que indica que tiene en cuenta todas las observaciones.
- El área de la región entre dos valores cualesquiera de una variable bajo una curva de distribución normal, es igual a la probabilidad de observar un valor dentro de ese rango cuando se elige de forma aleatoria alguna observación de distribución.

- La distribución normal tiene la característica que el área entre la media y un número dado de desviación estándar a partir de la media es igual en todas las distribuciones normales, esto se llama propiedad proporcional de la distribución normal (Anderson, y otros, 2004, 77).

La aplicación de esta distribución, se logra en muchas situaciones de problemas prácticos y su función de densidad tiene la forma de una campana.

Ecuación 11. Función de densidad para una distribución normal

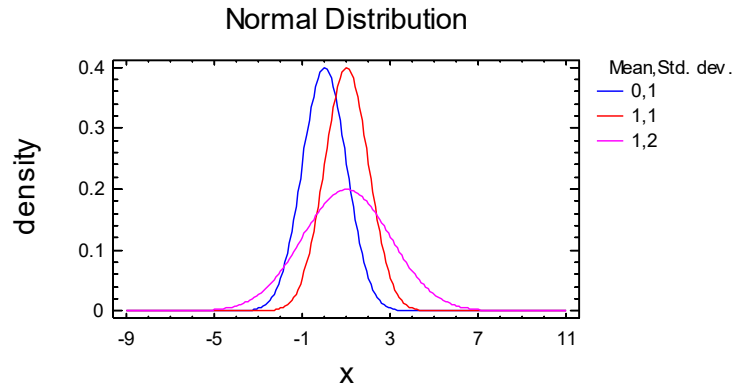
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}, \text{ para } -\infty < x < \infty$$

Donde:

- μ , media o valor esperado de la variable aleatoria x
- σ^2 , varianza de la variable aleatoria x
- σ , desviación estándar de la variable aleatoria x
- e , 2.71828
- π , 3.1416

Fuente: Anderson, y otros, 2004.

Gráfica 1. Función de densidad para una distribución normal

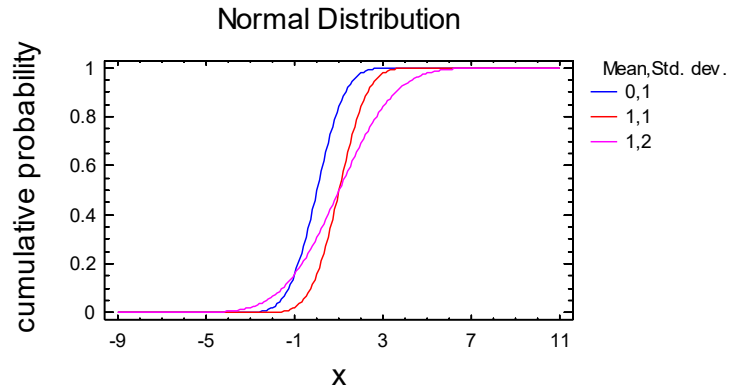


Fuente: autoría propia con la herramienta StatGraphics

Un mayor valor de desviación estándar, hace que la campana se aplane y se amplía la curva, debido a que los mayores valores de σ indican una mayor variabilidad en los valores de la variable aleatoria.

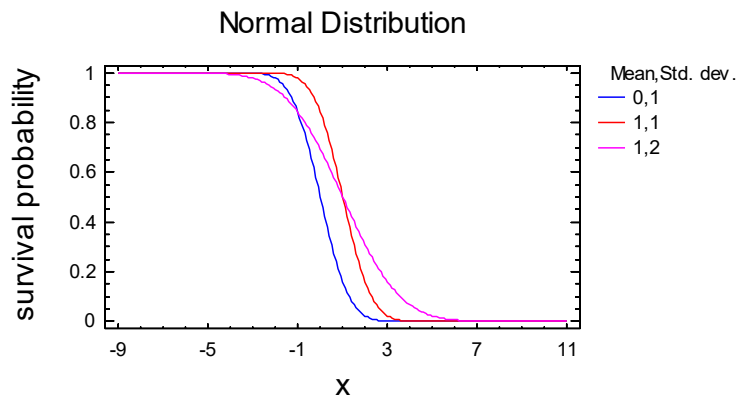
Cuando se hace uso de la distribución normal, no siempre se trabaja con la función de densidad, pues también se cuenta con las tablas de valores de probabilidad que representan el área bajo la curva $f(x)$. Para esto se habla de distribución normal estándar (Se dice que una variable aleatoria que tiene una distribución normal con una media de 0 y una desviación estándar de 1 tiene una distribución normal estándar) (Anderson, y otros, 2004, 77).

Gráfica 2. Función de distribución acumulada para una distribución normal



Fuente: autoría propia con la herramienta StatGraphics

Gráfica 3. Función de supervivencia para una distribución normal



Fuente: autoría propia con la herramienta StatGraphics

2.4.2 Distribución log normal.

En probabilidades y estadísticas, la distribución log normal es una distribución de probabilidad de una variable aleatoria con un logaritmo normalmente distribuido (la

base de una función logarítmica no es importante ya que, $\log_a X$ está distribuida normalmente si y solo si $\log_b X$ está distribuida normalmente). Si X es una variable aleatoria con una distribución normal, entonces $\exp(X)$ tiene una distribución log-normal (lognormal@, 2009).

La distribución log normal tiene las siguientes aplicaciones:

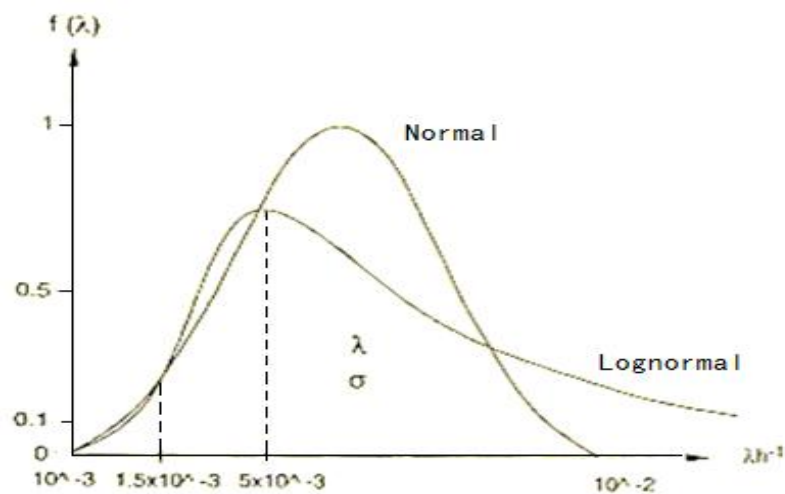
- Representa la evolución con el tiempo de la tasa de fallas, $\lambda(t)$, en la primera fase de vida de un componente, la correspondiente a las fallas infantiles en la curva de la bañera, entendiéndose como tasa de fallas la probabilidad que un componente que ha funcionado hasta el instante t , falle entre t y $t + dt$. En este caso la variable independiente de la distribución es el tiempo.
- Permite fijar tiempos de reparación de componentes, además es el tiempo la variable independiente de la distribución. El estudio de mecanismos de falla revela que la fatiga de los materiales sigue una distribución log normal (Mora Gutierrez, 2008, 118).
- Describe la dispersión de las tasas de falla de componentes, ocasionada por diferentes orígenes de los datos, distintas condiciones de operación, entorno, bancos de datos diferentes, etc. En este caso la variable independiente de la distribución es la tasa de fallas.

La distribución log normal tiene dos parámetros: μ^* (media aritmética del logaritmo de los datos o tasa de fallas) y σ (desviación estándar del logaritmo de los datos o tasa de fallas). La esperanza matemática o media en la distribución log normales mayor que su mediana.

La distribución log normal se caracteriza por las siguientes propiedades:

- Como depende de dos parámetros, se ajusta bien a un gran número de distribuciones.
- Es idónea para parámetros que son a su vez producto de numerosas cantidades aleatorias (múltiples efectos que influyen sobre la fiabilidad de un componente). (Cmapspublic@, 2007).

Gráfica 4. Comparación entre una distribución normal y una log normal.

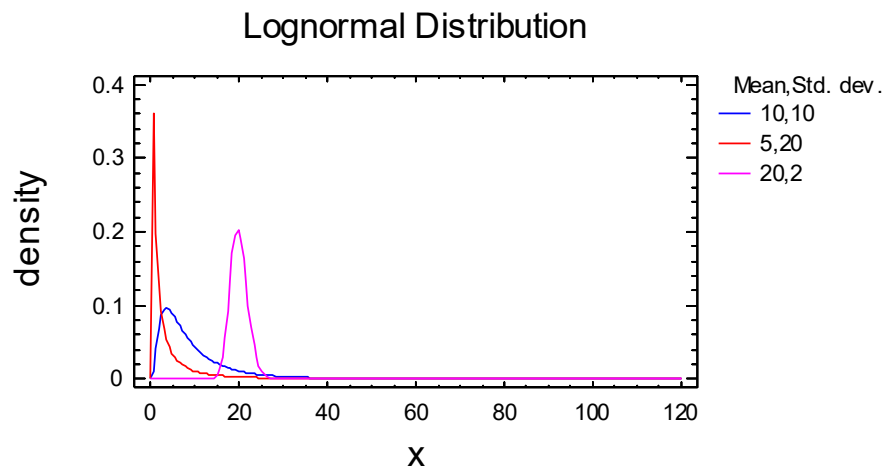


Fuente: Tamborero@, y otros, 2006.

La distribución log normal se ajusta a ciertos tipos de fallas (fatiga de componentes metálicos), vida de los aislamientos eléctricos, procesos continuos (procesos técnicos) y datos de reparación. Es también una distribución importante en la valoración de sistemas con reparación.

La distribución log normal es importante en la representación de fenómenos de efectos proporcionales, tales como aquellos en los que un cambio en la variable en cualquier punto de un proceso es una proporción aleatoria del valor previo de la variable. Algunas fallas en un programa de mantenimiento entran en esta categoría.

Gráfica 5. Función de densidad para la distribución log normal



Fuente: autoría propia con la herramienta StatGraphics

A medida que decrecen los valores de σ , la distribución log normal se hace más simétrica. Si σ se acerca a la unidad, la distribución log normal es equivalente aproximadamente a la distribución exponencial negativa. También se puede observar que para valores de $\sigma < 0,2$ la distribución log normal se aproxima a la distribución normal y hay una concentración de fallas (Tamborero@, y otros, 2006).

Ecuación 12. Función de densidad de la distribución log normal

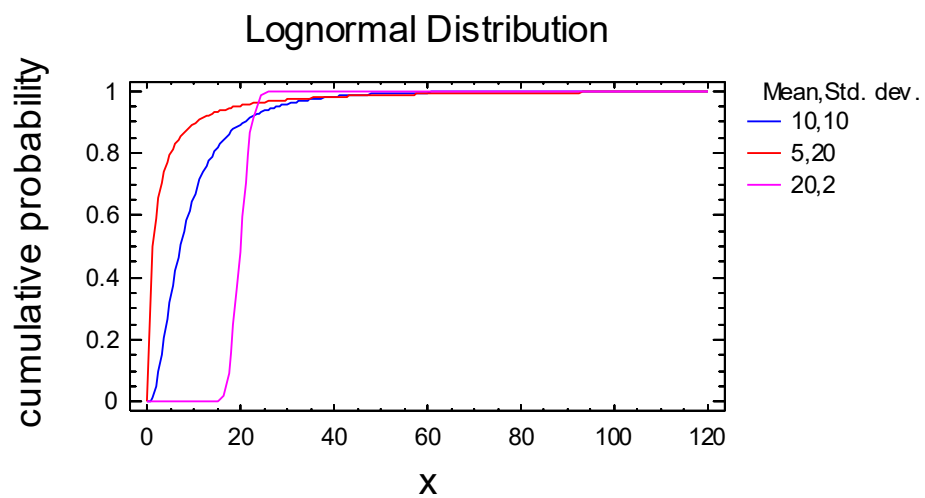
$$f(t) = \frac{1}{\sigma t(2\pi)^{1/2}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t)-\ln(t_m)}{\sigma}\right)^2\right]}$$

Donde:

- t_m = tiempo medio
- t = tiempo
- σ = desviación estándar en la distribución normal

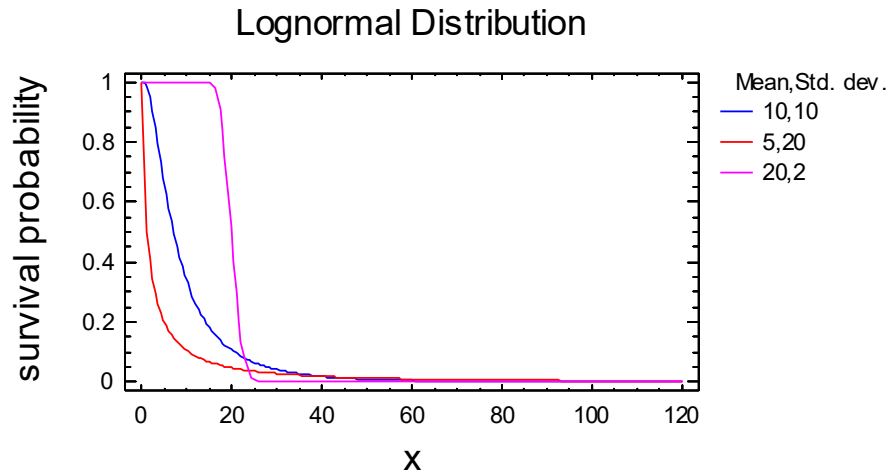
Fuente: Tamborero@, y otros, 2006.

Gráfica 6. Función acumulada para la distribución log normal



Fuente: autoría propia con la herramienta StatGraphics

Gráfica 7. Función de supervivencia para la distribución log normal



Fuente: autoría propia con la herramienta StatGraphics

2.4.3 Distribución exponencial.

La distribución exponencial se usa para la planeación del tiempo entre dos sucesos que sigan el proceso de Poisson Homogéneo y para el tiempo que transcurre hasta que se produce una falla (no depende del tiempo transcurrido). Esta distribución es una derivación de un proceso experimental de Poisson, pero toma como variable aleatoria el tiempo que tarda en producirse un hecho. Dicha variable aleatoria es continua (Lejarza@, 1999).

El tiempo entre las llegadas en las instalaciones de servicio y el tiempo de falla de los componentes y sistemas eléctricos, involucran la distribución exponencial (Mora Gutierrez, 2008, 123). La distribución exponencial no tiene memoria, lo cual implica que la probabilidad que el elemento falle en determinado tiempo, no depende del funcionamiento, debido a que no existe envejecimiento ni mayor

probabilidad de fallas al principio o al final del funcionamiento (Lejarza@, 1999).

Ecuación 13. Función de relación entre Poisson y exponencial.

$$\alpha = \frac{1}{\lambda}$$

Donde:

- α , parámetro de la distribución exponencial
- λ , parámetro de intensidad del proceso

Fuente: Chiguagua@, 2007.

La distribución de Poisson, se utiliza para calcular la probabilidad de números específicos de eventos durante un período o espacio particular. El período o la cantidad de espacio es la variable aleatoria. La relación entre la distribución exponencial (con frecuencia llamada exponencial negativa) y el proceso llamado de Poisson es simple (Chiguagua@, 2007), la distribución de Poisson se desarrolla como una distribución de un solo parámetro λ , el cual se relaciona con el parámetro de distribución exponencial α , de la siguiente manera:

La variable aleatoria x tiene una distribución exponencial, si su función de densidad es:

Ecuación 14. Función de densidad de la distribución exponencial

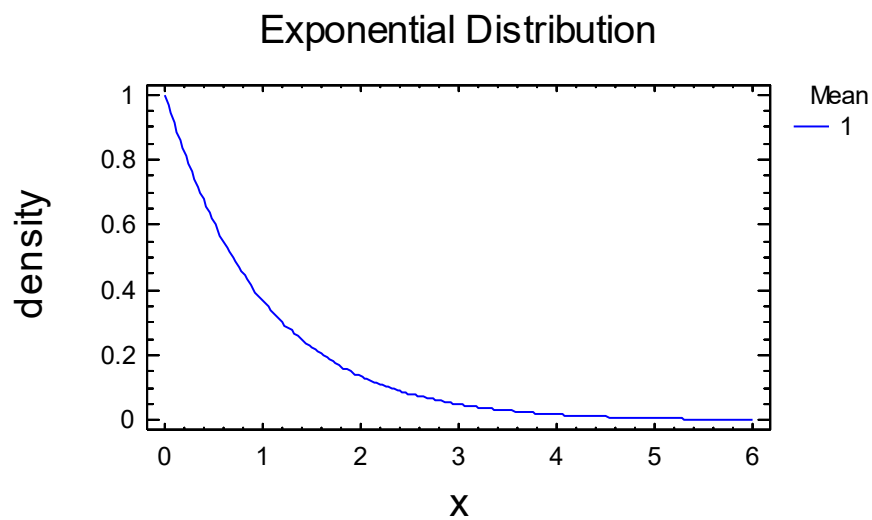
$$f(x) = \alpha e^{-\alpha x}, \text{ para } x > 0 ; f(x)=0 \text{ en cualquier caso donde } \alpha > 0$$

Donde:

- x , variable aleatoria.

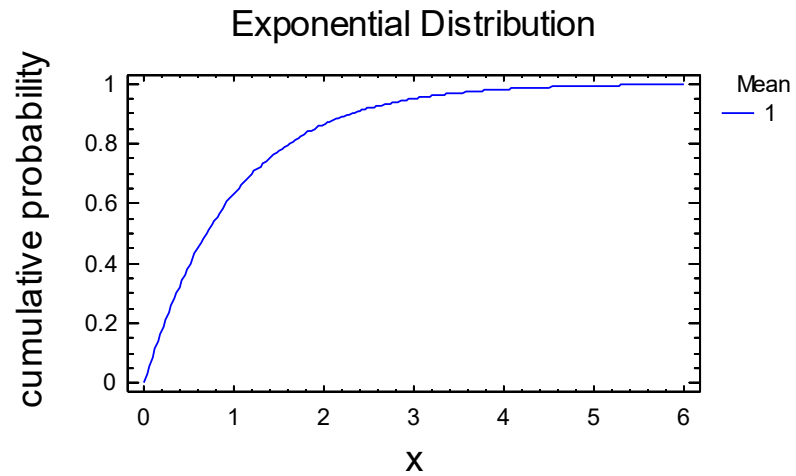
Fuente: Lejarza@, 1999.

Gráfica 8. Funcion de densidad para la distribución exponencial



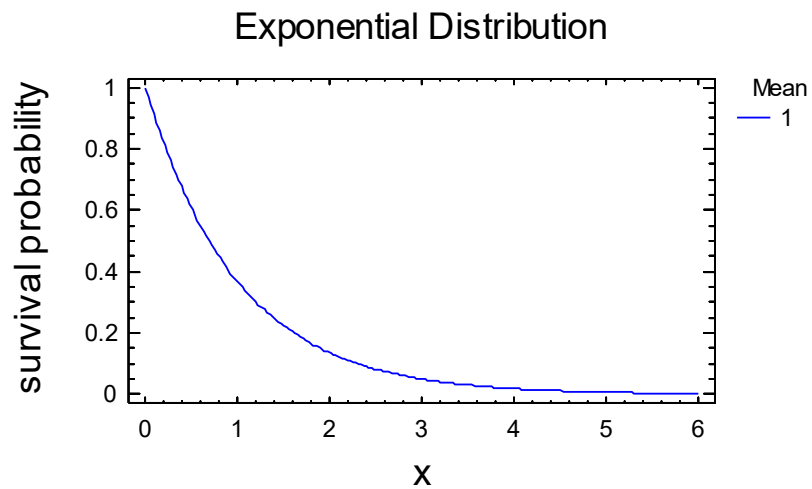
Fuente: autoría propia con la herramienta StatGraphics

Gráfica 9. Funcion acumulada para la distribución exponencial



Fuente: autoría propia con la herramienta StatGraphics

Gráfica 10. Funcion de supervivencia para la distribución exponencial



Fuente: autoría propia con la herramienta StatGraphics

2.4.4 Distribución de Weibull.

La distribución de Weibull complementa a la distribución exponencial y a la normal, se usa cuando describe en mayor medida la distribución de fallas o cuando se producen éstos (al menos 10) y los tiempos correspondientes no se ajustan a una distribución simple (Gamboa@, 2006).

Una de las ventajas que posee la distribución de Weibull es que se acomoda a las tres etapas de la curva de Davies (infancia, vida útil y envejecimiento). Ésta distribución cuenta con tres parámetros en general, lo que le da flexibilidad y permite obtener compatibilidad con otras distribuciones, estos parámetros son:

- γ (Gamma): indica el lapso en el cual la probabilidad de falla es nula, es el parámetro de posición (unidad de tiempos) o vida mínima y define el punto de partida u origen de la distribución.
- η (Eta): es el parámetro de escala o característica de vida útil, rango de la distribución transformada a lo largo del eje de los tiempos (Gamboa@, 2006). Su valor es determinante para fijar la vida útil del producto o del sistema (Mora Gutierrez, 2008, 98).
- β (Beta): es el parámetro de forma y representa la pendiente de la recta (solo si la distribución se transforma a lineal), describe el grado de variación de la tasa de fallas (Gamboa@, 2006), refleja la dispersión de los datos y determina la forma que toma la distribución. Cuando Beta es inferior a 1, se le denomina a esta fase como mortalidad infantil (tasa de falla decreciente), cuando toma valores cercanos a 1 se describe la fase de vida útil (tasa de falla constante y aleatoria) y

cuando toma valores mayores a 1, se le denomina fase de envejecimiento o desgaste (tasa de falla creciente) (Mora Gutierrez, 2008, 98).

Tabla 2. Interpretación del parámetro β .

Interpretación de β		Causas
<ul style="list-style-type: none"> ▪ $0 < \beta < 1$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tasa de fallas al disminuir 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mortalidad infantil
<ul style="list-style-type: none"> ▪ $\beta = 1$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tasa de fallas constante. Distribución exponencial 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ -Fallas aleatorias independientes del tiempo. ▪ -Una parte vieja es tan buena como una nueva. ▪ -Errores de mantenimiento. ▪ -Errores humanos. ▪ -Causado por fuerzas de la naturaleza; rayos, lluvia, etc. ▪ -Combinación de 3 o más modos de falla con diferentes betas. ▪ -Sistemas de varios componentes.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ $1 < \beta < 2$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tasa de fallas al incrementar (creciente cóncava) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ -Implica desgaste temprano. ▪ -Fatigas. ▪ -Erosión. ▪ -Fallas.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ $\beta = 2$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Distribución lineal (con tasa de fallas con crecimiento) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ -Implica desgaste. ▪ -Fallas.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ $\beta > 2$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tasa de fallas creciente, convexa 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ -Implica desgaste. ▪ -Fallas.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ $3 \leq \beta \leq 4$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se asemeja a la normal, envejecimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ -Envejecimiento operacional, desgaste rápido. ▪ -Modos de fallas con envejecimiento operacional (corrosión por esfuerzo, propiedades de los materiales, materiales quebradizos como la cerámica, algunos tipos de erosión).

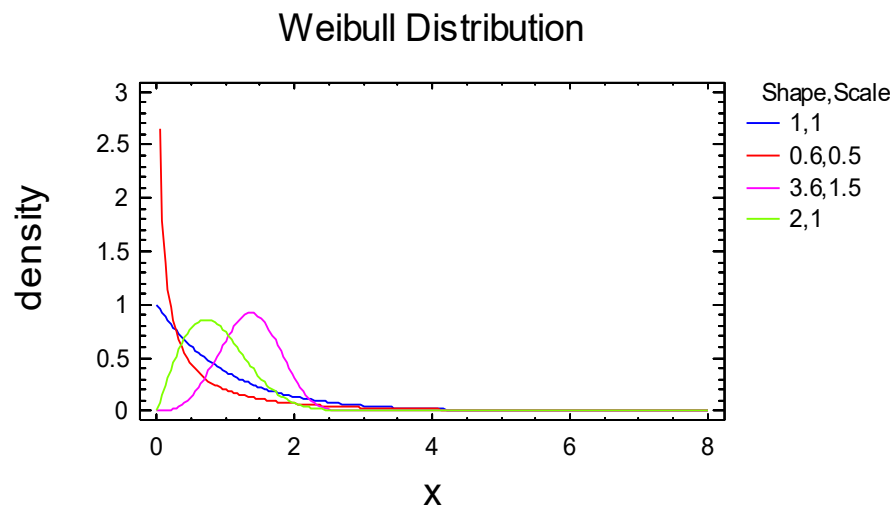
Fuente. (Gamboa@, 2006).

Ecuación 15. Función de densidad de Weibull

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^\beta \right]$$

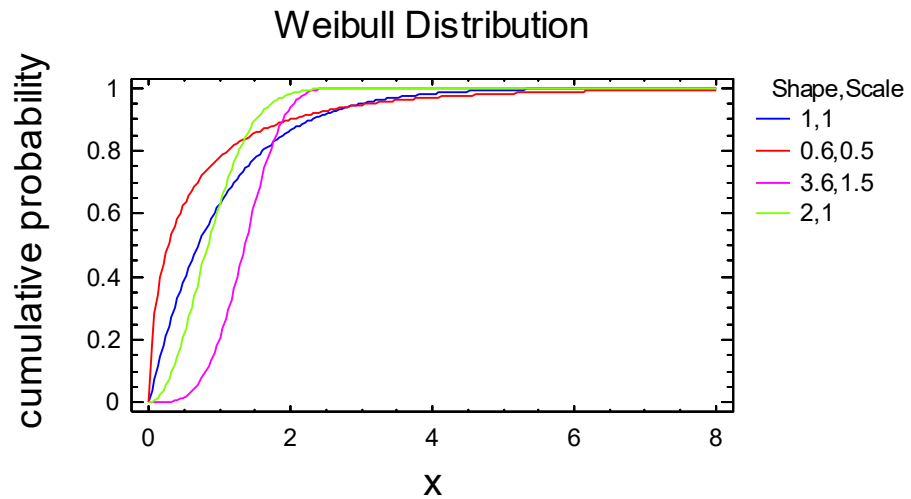
Fuente: Mora Gutierrez, 2008, 98.

Gráfica 11. Función de densidad de para la distribución de Weibull



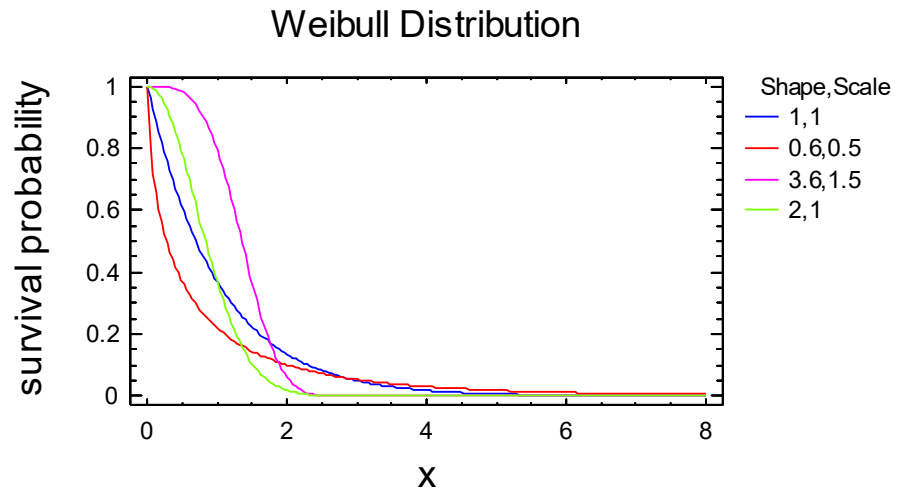
Fuente: autoría propia con la herramienta StatGraphics

Gráfica 12. Función acumulada de fallas para la distribución de Weibull



Fuente: autoría propia con la herramienta StatGraphics

Gráfica 13. Función de tasa de fallas para la distribución de Weibull



Fuente: autoría propia con la herramienta StatGraphics

2.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Para lograr mayor control en la industria, es indispensable integrar la dirección con los procesos que involucran a mantenimiento, por medio de indicadores CMD o clase mundial, para esto es necesario que se realicen mediciones en cada uno de los procesos (aprovechamiento de máquinas, recursos humanos, reparaciones, control de inventarios, control de costos, etc.) y se realice el respectivo seguimiento.

Los indicadores representan un valor puntual, mientras que las distribuciones de fallas muestran el comportamiento del modelo que se analiza en función del tiempo.

Importancia de la descripción de los indicadores en el proyecto

Los indicadores están vinculados a la confiabilidad y mantenibilidad, ya que se trabaja con variables aleatorias en el tiempo.

3. CRITERIOS RELEVANTES DE LA SIMULACIÓN Y SU UTILIZACIÓN EN MANTENIMIENTO

3.1 OBJETIVO

Explicar los criterios relevantes de la simulación y su utilización en el área de mantenimiento.

3.2 INTRODUCCIÓN

La tecnología y la innovación, han contribuido en el campo de la simulación para desarrollarlo y ampliar sus horizontes, lo que permite llegar a una toma de decisiones acertada y oportuna.

La simulación estudia el contexto del problema y tiene en cuenta los índices de medición de la efectividad del sistema, para esto se debe definir el proyecto que se va a modelar.

Para la obtención de los resultados esperados, es necesario definir las variables que afectan el modelo, saber cómo se relacionan éstas y confrontarlas con un prototipo de estudio.

Las funciones de mantenimiento se ejecutan frente a la ocurrencia de una falla o error en un sistema, maquinaria, equipo o instalación. Por lo tanto, se crea la necesidad de optimizar el rendimiento de la vida útil de los componentes industriales que se encuentran dentro de los procesos e instalaciones de una

planta industrial.

La simulación en mantenimiento, permite hacer seguimiento de los comportamientos que ocurren en problemas reales en las máquinas, por este motivo, se opta por aplicar un método que permita a las personas predecir los hechos o comportamientos que pueden implicar una falla.

El principal objetivo de la simulación es extraer una serie de datos teóricos, registrados en ciertos períodos de tiempo, esta gestión se optimiza al hacer un seguimiento a éstas series de datos. La simulación estudia casos teóricos en diversos campos, en este caso se estudian los indicadores CMD de mantenimiento en un caso industrial.

3.3 INICIOS DE LA SIMULACIÓN

En los últimos tiempos, se busca tener formas innovadoras e inmediatas para la toma de decisiones y el diseño de procesos y productos, en este sentido las técnicas de simulación han evolucionado para brindar soporte a las respuestas.

Los campos en los que se puede aplicar la simulación, son varios, por ejemplo, determinar una mejor localización para una planta, diseñar un nuevo sistema de trabajo, efectuar un análisis productivo o mejorar un proceso existente, entre otros, sin duda, la facilidad que otorga a la resolución de éstas y muchas otras problemáticas, han hecho de la simulación una herramienta cuyo uso y desarrollo se ha visto adelantado (Garcia Dunna, 2006,2).

La simulación provee diversidad de herramientas estadísticas que permiten un manejo eficiente de la información relevante bajo análisis y una mejor presentación e interpretación de la misma, ya que este concepto de simulación engloba soluciones para diferentes propósitos (2).

3.4 DEFINICIÓN DE SIMULACIÓN

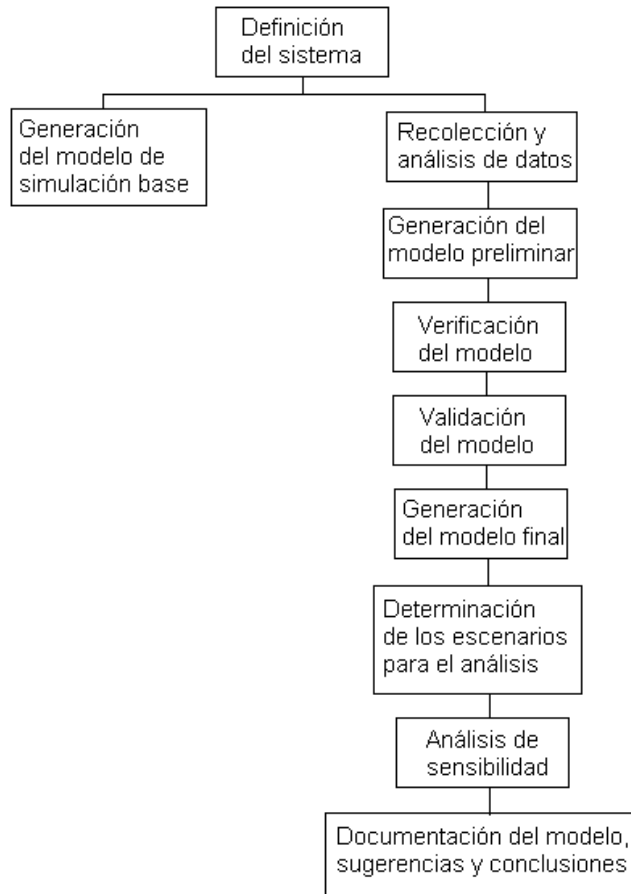
Según Robert E. Shannon, la simulación “es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar éste” (Sierra, 2005, 9).

H. Naisel y G. Gnugnoli definen la simulación como: “una técnica numérica para realizar experimentos en una computadora digital. Estos experimentos involucran ciertos modelos matemáticos y lógicos que describen el comportamiento de sistemas de negocios, económicos, sociales, biológicos, físicos o químicos a través de largos periodos de tiempo” (9).

3.4.1. Pasos para realizar un estudio de simulación.

Se requieren la ejecución de una serie de actividades y análisis que permiten obtener información adecuada para la simulación. Estas actividades son:

Ilustración 4. Pasos para desarrollar un estudio de simulación



Fuente: autoría propia.

- Definición del sistema bajo estudio: en esta etapa es necesario tener claro el contexto del problema, lo que significa, conocer el sistema a modelar. Para esto se requiere saber qué origina el estudio de simulación y establecer los supuestos del modelo. Se definen las variables de decisión (identificar los objetivos del proyecto, especificar los índices de medición de la efectividad del sistema, detallar los objetivos específicos del modelo y definir el sistema que se va a modelar), la

forma cómo interactúan estas, los alcances y limitaciones.

Antes de concluir con este paso, se estudia la información para lograr establecer un modelo conceptual del sistema, para esto se incluyen todos los elementos que lo componen con sus respectivas fronteras, así como de las interacciones entre flujos de productos, personas, recursos y variables.

- Generación del modelo de simulación base: una vez que se ha definido el sistema en términos de un modelo conceptual, la siguiente etapa del estudio consiste en la generación de un modelo de simulación base. Se requiere información estadística sobre el comportamiento de las variables de decisión del sistema. La generación de este modelo incluye las interrelaciones de los subsistemas que existan en el problema a modelar.

Al momento de avanzar en el modelo base, se incluyen las variables aleatorias del sistema, con sus respectivas distribuciones de probabilidad asociadas, asimismo, en caso que se requiera animación, éste también es un momento para definir que gráfico puede representar el sistema que se modela.

- Recolección y análisis de datos: de manera paralela a la generación del modelo base, es posible comenzar la recopilación de la información estadística de las variables aleatorias del modelo. En esta etapa se determina qué información es útil para la determinación de las distribuciones de probabilidad asociadas a cada una de las variables aleatorias necesarias para la simulación.

De acuerdo al autor, es importante dedicar el tiempo a esta actividad, de no contar con la información o en caso de desconfiar de la que se tiene disponible, se realiza un estudio estadístico del comportamiento de la variable a identificar, para posteriormente incluirla en el modelo. Al finalizar la recolección y análisis de datos para todas las variables del modelo, se tienen las condiciones necesarias para generar una versión preliminar del problema que se simula.

- Generación del modelo preliminar: en esta etapa se integra la información obtenida a partir del análisis de los datos y los supuestos del modelo que se requieran para tener un modelo que simule la realidad del problema bajo estudio.

En el diseño de un nuevo proceso o esquema de trabajo, donde se cuenta con información estadística, se estima un rango de variación o se determinan (con ayuda del cliente) valores constantes para realizar el modelado. Si éste es el caso, el encargado de la simulación realiza sugerencias de distribuciones de probabilidad que se asocien al tipo de proceso que se modela. Al finalizar esta etapa el modelo está listo para su primera prueba: su verificación o, en otras palabras, la comparación con la realidad.

- Verificación del modelo: una vez que se han identificado las distribuciones de probabilidad de las variables del modelo y se han implantado los supuestos acordados, se realiza un proceso de verificación de datos para comprobar la propiedad de la programación del modelo, y comprobar que los parámetros usados en la simulación funcionen. Los problemas, que requieren operaciones de

programación o que involucran distribuciones de probabilidad difíciles de programar, alteran el comportamiento del sistema y lo hacen diferente a lo esperado.

Por otro lado, no se tiene en cuenta la posibilidad que ocurran errores humanos al alimentar el modelo con la información. Incluso existen casos en que los supuestos iniciales se modifiquen durante el desarrollo del modelo.

- Validación del modelo: una vez que se ha completado la verificación, el modelo está listo para su comparación con la realidad del problema que se modela.

El proceso de validación del modelo consiste en realizar pruebas al mismo, con información de entrada real para observar su comportamiento y analizar sus resultados.

Si el problema bajo simulación involucra un proceso que se desea mejorar, el modelo se somete a pruebas con las condiciones actuales de operación, lo que da como resultado un comportamiento similar al que se presenta realmente en el proceso. Por otro lado, si se diseña un nuevo proceso la validación se complica. Una manera de validar el modelo en este caso, consiste en introducir escenarios que muestren el comportamiento congruente con las expectativas que se tienen de acuerdo con la experiencia.

Cualquiera que sea la situación, el analista justifica y conoce los comportamientos

que sean contrarios a las experiencias de los especialistas en el proceso que participan de su validación.

- Generación del modelo final: una vez que el modelo se ha validado, el analista está listo para realizar la simulación y estudiar el comportamiento del proceso. En caso que se desee comparar escenarios diferentes para un mismo problema, éste será el modelo raíz; en tal situación, el siguiente paso es la definición de los escenarios a analizar.
- Determinación de los escenarios para el análisis: una manera de determinar el modelo consiste en utilizar un escenario pesimista, uno optimista y uno intermedio para la variable de respuesta más importante. Sin embargo, es preciso tomar en cuenta que no todas las variables se comportan igual ante los cambios en los distintos escenarios, por lo que tal vez sea necesario que más de una variable de respuesta se analice bajo las perspectivas pesimista, optimista e intermedia.

El autor menciona que el riesgo de esta situación radica en que el analista llega a un diseño de experimentos capaz de generar réplicas, lo que redundaría en un incremento considerable de costo, análisis y tiempo de simulación. Es por ello que muchos paquetes de simulación cuentan con herramientas para realizar este proceso, donde se eliminan la animación y se acortan los tiempos de simulación.

Estas herramientas permiten realizar varias réplicas del mismo escenario para obtener resultados con estadísticas importantes respecto de la toma de decisiones

(por ejemplo, los intervalos de confianza). Por su parte, el analista también realiza la selección de escenarios y sugiere aquellos que considere importantes.

- Análisis de sensibilidad: una vez que se obtienen los resultados de los escenarios es importante realizar pruebas estadísticas que permitan comparar los escenarios con los resultados finales. Si dos de ellos tienen resultados similares será necesario comparar sus intervalos de confianza respecto de la variable de respuesta final. Si no hay intersección de intervalos la estadística muestra que los resultados no son iguales; sin embargo, si los intervalos se traslapan será imposible determinar, por medios estadísticos, que una solución es mejor que otra.

Para obtener un escenario ganador en estos casos, se realizan réplicas de cada modelo o se incrementa el tiempo de simulación de cada corrida. Con ello se busca acortar los intervalos de confianza de las soluciones finales y, por consiguiente, incrementar la probabilidad de diferenciar las soluciones.

- Documentación del modelo, sugerencias y conclusiones: el autor aconseja que, una vez realizado el análisis de los resultados, es necesario efectuar toda la documentación del modelo.

Esta documentación es importante, porque permite el uso del modelo generado en caso que se requieran ajustes futuros. En ella se deben incluir los supuestos del modelo, las distribuciones asociadas a sus variables, todos sus alcances y limitaciones y, en general, la totalidad de las consideraciones de programación.

También se incluyen sugerencias tanto del uso del modelo como de los resultados obtenidos, para realizar un reporte completo.

Por último, se presentan asimismo las conclusiones del proyecto de simulación, a partir de las cuales se obtienen los reportes ejecutivos para la presentación final (Garcia Dunna, 2006, 10).

3.4.2. Ventajas y desventajas en la simulación.

La simulación es una de las diversas herramientas con las que cuenta el analista para tomar decisiones y mejorar procesos. Sin embargo, es necesario destacar que, como todas las demás opciones que se dispone, la simulación presenta ventajas y desventajas que es preciso tomar en cuenta al determinar si es apta para resolver un problema determinado.

- Es una herramienta para conocer el impacto de los cambios en los procesos sin necesidad de llevarlos a cabo en la realidad.
- Mejora el conocimiento del proceso actual al permitir que el analista vea cómo se comporta el modelo generado bajo diferentes escenarios.
- Se utiliza como medio de capacitación para la toma de decisiones.
- Es más económico realizar un estudio de simulación que hacer cambios en los procesos reales.
- Muestra escenarios en busca de las condiciones de trabajo de los procesos que se simulan.
- En problemas de gran complejidad, la simulación permite generar una solución.

Entre las desventajas que presenta la simulación están:

- Aunque muchos paquetes de software permiten obtener un escenario a partir de una combinación de variaciones posibles, la simulación no es una herramienta de optimización.
- La simulación es costosa cuando se quiere emplearla en problemas sencillos de resolver, en lugar de utilizar soluciones analíticas que se han desarrollado de manera específica para ese tipo de casos.
- Se requiere tiempo para realizar un estudio de simulación y no todos los analistas tienen la disposición para obtener una respuesta.

3.5 LA SIMULACIÓN EN EL MANTENIMIENTO

La simulación en los problemas permite destacar los comportamientos comunes ante situaciones y plasmarlos de modo tal que se transcriban en comportamiento reales, lo que quiere decir, que por medio de la simulación se obtienen descripciones puntuales de comportamientos reales, que son útiles al momento de enfocarse en el tema de mantenimiento.

La solución a un problema que es simulado, trae consigo una serie de ventajas. Una de estas ventajas es la comprensión de la solución, es tanto así que si se hace el ejercicio de evaluar un problema que se ha comprendido, se tienen posibilidades de plantear maneras de obtención de resultados; otra ventaja es la parte de visualización del problema, que implica la posibilidad de repetirlo con las

condiciones que se requieran y las veces que sea necesario.

La sucesión de comportamientos o fenómenos que ocurren en problemas reales en las máquinas, lleva a un método de predicción que adelanta a las personas a los hechos o comportamientos que implican una falla, también requiere de un estudio que contenga la simulación de situaciones reales en tiempos reales.

Los tiempos de operación de los equipos, reflejan su estado y dejan huella en un historial que tiene en cuenta toda la vida del equipo en funcionamiento, desde la puesta en marcha hasta la etapa final; los datos que sirven de registro y que enmarcan su comportamiento histórico, deben ser tomados con precisión, ya que de esta manera se logra una exactitud al momento de registrarse una predicción de una futura falla y se proyectan las simulaciones para este campo.

La simulación en mantenimiento, lleva a plantear estrategias y normas, que lo centran en la confiabilidad. Esta técnica permite tomar decisiones de forma rápida, además de permitir evaluar alternativas de mejoramiento antes de comprometer costosos recursos de capital, convirtiéndose en una manera costo-efectiva de optimizar la disponibilidad de las plantas (Holguín Duarte@, 2006).

La simulación computarizada de estrategias de mantenimiento permite que el proceso de optimización de éste se integre a los procesos de gestión de activos que se encuentran en curso dentro de una compañía. La simulación permite:

- Tomar decisiones de mantenimiento para ser evaluadas contra las

necesidades del negocio.

- Evaluar alternativas de estrategias de mantenimiento sobre un tiempo de vida dado.
- Actualizar las decisiones con base en información de fallas.
- Predecir requerimientos de presupuesto (repuestos, mano de obra) y modelar escenarios alternativos (Holguín Duarte@, 2006).

3.6 TEORÍA DE COLAS

Se define como un conjunto de modelos matemáticos que describe sistemas de líneas de espera o sistemas de colas y sirven para encontrar el comportamiento de estado estable para un sistema dado (Fernandez@, 2009). Además, existe una relación entre dos procesos normalmente aleatorios que interactúan entre sí.

Una cola se define como línea de espera, esta se forma por el desequilibrio temporal entre la demanda del servicio y la capacidad del sistema para suministrarlo. Esto quiere decir, que los clientes pueden esperar o no en cola, debido a que los medios existentes sean inadecuados para satisfacer la demanda del servicio; en este caso, la cola tiende a ser cada vez más larga a medida que transcurre el tiempo. En las formaciones de colas se habla de clientes, tales como máquinas dañadas a la espera de ser rehabilitadas (COLAS@, 2009).

Existen diferentes medidas de rendimiento que se utilizan para evaluar un sistema de colas en estado estable, los administradores se preocupan por el nivel de

servicio que recibe un cliente, para esto diseñan y ponen un sistema de colas, así como el uso apropiado de las instalaciones de servicio de la empresa.

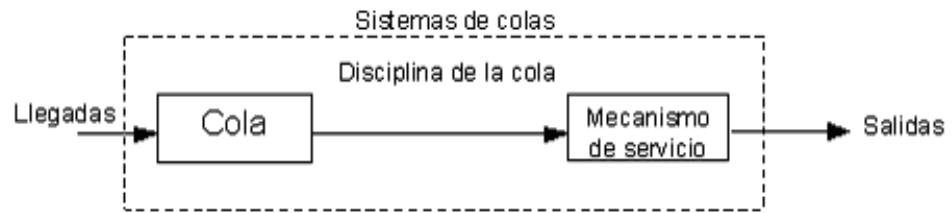
La teoría de colas consiste en identificar el nivel de capacidad del sistema que minimiza el costo global de esta, evaluar el impacto que las alternativas de modificación de la capacidad del sistema en el costo total del mismo, establecer un balance equilibrado entre las consideraciones cuantitativas de costes y las cualitativas de servicio y por último, se tiene en cuenta, prestar atención al tiempo de permanencia en el sistema o en la cola: la paciencia de los clientes depende del tipo de servicio específico considerado y eso puede hacer que un cliente abandone el sistema.

La teoría de la formación de colas busca una solución al problema de la espera y predice el comportamiento del sistema. Pero una solución al problema de la espera consiste en minimizar el tiempo que los clientes pasan en el sistema y también en minimizar los costos totales de aquellos que solicitan el servicio y de quienes lo prestan (Martinez@, 2004).

3.6.1 Componentes de los sistemas de colas.

Un sistema de colas se divide en dos componentes, la cola y la instalación de servicio. A la cola, se unen las llegadas, que son las unidades que entran en el sistema para recibir el servicio, luego, éstas van a la instalación de servicio y por último se dirigen a la salida. Una vez se completa el servicio, las llegadas se convierten en salidas.

Ilustración 5. Esquema de un sistema de colas

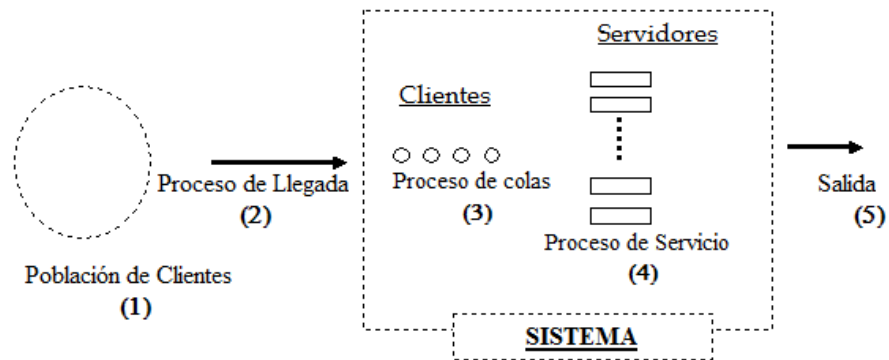


Fuente: Ribera, 2009.

Habitualmente la teoría de colas opera sobre los tiempos entre llegadas consecutivas de clientes: modelos típicos son el teórico de llegadas a intervalos fijos iguales, o los que consideran diferentes distribuciones de probabilidad (Ribera, 2009).

Elementos existentes en la teoría de colas:

Ilustración 6. Esquema de los elementos en la teoría de colas



Fuente: Fernandez@ Jeri, 2009.

- Fuente de entrada o población potencial: una característica de la fuente de entrada es su tamaño, se refiere al número total de clientes que requiere un servicio. Puede ser infinito o finito.
- Cliente: es el individuo de la población potencial que solicita servicio.
- Capacidad de la cola: es el máximo número de clientes que están en la cola (antes de comenzar a ser servidos). También, son finita o infinita.
- Disciplina de la cola: se refiere al orden en el que se seleccionan sus miembros para recibir el servicio. Estos son:
 - *FIFO (first in first out)*. Atiende primero al cliente que antes haya llegado.
 - *LIFO (last in first out)*. También conocida como pila que consiste en atender primero al cliente que ha llegado de último.
 - *RSS (random selection of service)*. Selecciona los clientes de manera aleatoria, de acuerdo a un procedimiento de prioridad o a algún otro orden.
 - *Processor Sharing* – sirve a los clientes igualmente. La capacidad de la red se comparte entre los clientes y todos experimentan con eficacia el mismo retraso.
- Mecanismo de servicio: consiste en una o más instalaciones de servicio, cada una de ellas con uno o más canales paralelos de servicio, llamados servidores.

3.6.2 Simulación de un sistema de colas.

Un diagrama general para la simulación de un sistema de colas se compone de una serie de acontecimientos, el primero es inicializar, el segundo consiste en leer las variables, las constantes y los parámetros que intervienen en el sistema y el tercero es tomar entre los eventos cual está más próximo a ocurrir. A partir de este

momento, se desencadenan las consecuencias de la ocurrencia de estos eventos y se procede a programar las siguientes ocurrencias, finalmente, se obtienen los resultados de todas las variables y parámetros, se elaboran los informes y el programa se retroalimenta para determinar el próximo acontecimiento (Dyner R., y otros, 2008, 96).

3.6.3 Simulación de un sistema de colas para un caso general de mantenimiento.

Se tiene un sistema compuesto por una cola y un canal de servicio, en esta etapa inicial se identifican dos acontecimientos, una llegada (máquina averiada) y la culminación de un servicio (máquina reparada). Existe un tercer acontecimiento que es el inicio de un servicio, pero éste no requiere ser identificado puesto que coincide con los otros dos acontecimientos (97).

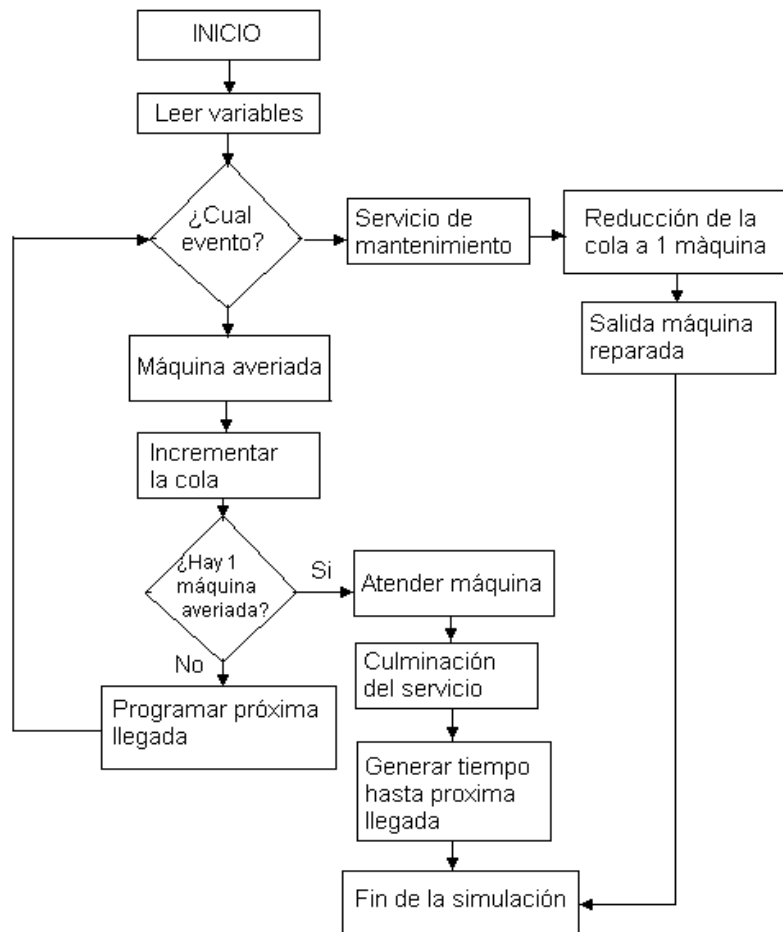
El primer paso consiste en leer las variables y parámetros que entran al sistema y se inicializan las variables y las constantes que se consideren necesarias. A continuación, se consulta que ocurre primero, si la llegada de una máquina averiada, un servicio de mantenimiento, o la finalización de la simulación.

Si ocurre primero la llegada de una máquina averiada, se incrementa la cola en una unidad y se actualizan las estadísticas, se pregunta cuantas máquinas averiadas hay en la cola; si hay una, se procede a atenderla, se programa la culminación del servicio, se genera el tiempo que va a transcurrir hasta la próxima llegada y se establece el instante al cual ocurrirá esa llegada; finalmente, se regresa a preguntar por el próximo evento.

Si la cola cuenta con más de una máquina averiada, no se genera tiempo de servicio sino que se pasa a programar directamente la próxima llegada y se vuelve

a establecer el próximo acontecimiento.

Ilustración 7. Simulación de un sistema de colas para un caso de mantenimiento



Fuente: autoría propia.

Cuando se presenta la conclusión del servicio de mantenimiento, se reduce la cola en una sola máquina averiada, se actualizan las estadísticas correspondientes y se le da salida a ésta máquina ya reparada. Se preguntan si quedan más máquinas sin reparar en la cola, en caso positivo, se pasa a atenderlo, se simula

la duración del servicio de mantenimiento y se programa la culminación de este servicio. Si no hay máquinas sin reparar en la cola, se programa el fin del próximo servicio de mantenimiento para un instante posterior a la culminación de la simulación.

Con el sistema vacío, se debe garantizar que no ocurra una próxima salida antes de una próxima llegada o del fin de la próxima simulación. En ambas situaciones, se encuentra cual es el próximo acontecimiento que ocurrirá, sea la llegada de una máquina averiada, la salida de una reparada o el fin de la simulación.

Cuando el fin de la simulación es el próximo acontecimiento en ocurrir, se realizan las actualizaciones finales; se calculan los totales, promedios y estadísticas, para finalmente, producir un informe que muestre el comportamiento del sistema de mantenimiento simulado (98).

3.7 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA CON SIMULACIÓN

La simulación del ciclo de vida de un equipo ayuda a determinar los costos y consecuencias operacionales, ambientales y de seguridad asociadas con la causa de falla. Estos costos y consecuencias son obtenidos a partir de la estrategia *LCC (Life Cycle Cost)*, de igual manera la simulación ayuda a obtener los intervalos de mantenimientos correctivos y de inspección, pues ésta realiza comparaciones de costos y disponibilidad para diferentes intervalos de mantenimiento (Holguín Duarte, 2006).

El concepto de costo de ciclo de vida de un producto, tiene en cuenta no solo el costo de compra sino la suma del costo de adquisición, costo de mantenimiento, costo de utilización y costo de fin de vida. Para que un fabricante pueda estimar el costo de ciclo de vida de las máquinas a un usuario final que lo requiera, éste debe disponer del conocimiento del comportamiento real de la máquina.

El costo de adquisición se compone por el costo de venta más otros costos asociados a la administración, a la instalación, a la puesta en marcha, a la formación y al transporte.

El costo de explotación debe ser dividido en costos de operación y en costos de mantenimiento. Dentro de los costos de mantenimiento se debe llevar a cabo una división entre los costos relacionados con los mantenimientos planificados y los no planificados. Finalmente, los costos de fin de vida pueden variar de acuerdo a la legislación de cada país.

Los costos de mantenimientos preventivos se refieren a todos los costos relacionados con el personal y los materiales necesarios para la realización de una serie de tareas planificadas; los costos de mantenimiento no planificados o correctivos son todos aquellos costos referidos al personal y los materiales necesarios para la reparación de fallas producidos por las máquinas en funcionamiento.

Los conceptos de ciclo de vida se derivan de una estimación inicial que el fabricante de la máquina realiza como parte de sus actividades de definición,

diseño, desarrollo, fabricación, montaje, validación e instalación, esto se realiza con el fin de ofrecer una garantía al comprador. En caso que la máquina no esté controlada por el fabricante y se haya superado el periodo de garantía, éste dejará de tener información actualizada del comportamiento real de su funcionamiento (Askarate@, y otros, 2005).

En el costo de ciclo de vida se simulan las fallas, los mantenimientos planeados y los cambios de operación, cada uno de éstos cuenta con una serie de variables o procesos que los componen. Estas variables son las que se tienen en cuenta en el momento de realizar la simulación y dependen de cada problema que se analiza.

En los estudios de viabilidad económica es necesario conocer los aspectos del *LCC*, con el fin de evitar la incertidumbre (Parra, 2009, 4). El costo del ciclo de vida permite analizar los efectos costo-efectivos de la aplicación de los diferentes tipos de mantenimiento y permite ver la relación que existe entre éstos.

La relación entre mantenimientos planeados y no planeados es inversa y depende del tipo de mantenimiento que se realice en el momento, lo que significa que, cuando los planeados aumentan, es porque se sacrifican los mantenimientos no planeados, por ejemplo si en un momento dado se realiza un predictivo, esto indica que el mantenimiento planeado está en mayor proporción que el no planeado del cual se dice que casi desaparece.

En el caso en el que se realiza un mantenimiento preventivo, lo que sucede es que el planeado aumenta en relación al no planeado, aunque no en tanta proporción

como cuando se realiza un mantenimiento predictivo. A diferencia de estos dos casos anteriormente explicados, cuando se hace un correctivo el mantenimiento planeado es mucho menor que el no planeado.

3.8 MANTENIMIENTO CON *TPM* (*OEE*)

El mantenimiento productivo total (*TPM*) es un moderno sistema gerencial de soporte al desarrollo de la industria, que hace partícipe a todo el personal de la organización para formar equipos de producción atentos (García Palencia, 2003). El *TPM* promueve que todos los empleados trabajen unidos para alcanzar objetivos comunes, al adoptar esta técnica, el trabajo de conservación de los equipos y máquinas de producción pasan a ser responsabilidad de cada empleado, es así como se fusionan los departamentos de producción y mantenimiento (Arias@, 2003).

Esta metodología establece estrategias para mejorar la productividad empresarial, apuntándole al éxito y a la competitividad, para afrontar el proceso de globalización y la apertura económica.

El *TPM* es una filosofía que pertenece a un enfoque dirigido hacia la calidad total, éste hace énfasis en la prevención y predicción de las averías y del mantenimiento de las máquinas, mejora la eficacia de los equipos, realiza mantenimientos autónomos por operadores, mejora la habilidad operativa y hace una gestión temprana de los equipos para evitar problemas futuros.

El indicador de gestión del *TPM* es utilizado principalmente en la industria manufacturera y se define como la Efectividad Global del Equipo, cuyo valor se define como el producto de tres factores, Disponibilidad, Eficiencia (Tasa Rendimiento) y Tasa de Calidad (García Palencia, 2003).

3.8.1 Etapas del indicador de efectividad global del equipo (*OEE, Overall Equipment Effectiveness*).

Los métodos y procesos de gestión de mantenimiento son perfeccionados constantemente por medio del indicador de Efectividad Global del Equipo (*OEE, Overall Equipment Effectiveness*), existen seis etapas que identifican este desarrollo:

- Básico. En esta etapa se identifican los equipos, se definen las tareas para las intervenciones de mantenimientos programados, recomendaciones de seguridad, y generan las órdenes de servicio programadas y no programadas, se definen e implementan los mecanismos de recolección de datos, se establecen los mecanismos de contratación de administración de servicios de terceros y se analizan los informes bajo la forma de indicadores.

El cumplimiento de estas características mencionadas en el párrafo anterior, se obtiene un 45% de *OEE* para el proceso productivo o de servicio.

- Integrado. Involucra la dirección y las demás áreas en búsqueda de mayor eficiencia y reducción de costos. En este sistema, se establecen las necesidades reales de capacitación para calificar el personal de mantenimiento y aplicar nuevas

tecnologías en procesos de gestión. Seguido de esto, se realiza un análisis y diagnóstico que indica las características del sistema adecuado de gestión de mantenimiento para la empresa.

En este punto, el sistema adecuado se encuentra caracterizado por los parámetros y reglamentado de acuerdo con las necesidades requeridas por la empresa, en este momento se obtiene un 60% de efectividad global del equipo para el proceso productivo o de servicio.

- Por condición (Predictivo). Se efectúa el análisis de la conveniencia de implementar técnicas de predicción, también se realizan los análisis de síntomas y estadístico, de acuerdo con la importancia y características de las necesidades. En esta etapa, se preparan las rutas de recolección de datos o mediciones, se define quien hace la recolección de éstos y quien los analiza (si la propia empresa o una empresa contratada), para realizar la gestión de mantenimiento y generar las ordenes de trabajo del proceso predictivo.

Las características anteriores proporcionan una efectividad global del equipo de un 70% para el proceso productivo o de servicio.

- Con apoyo del operador. Se capacita al operador para desarrollar cinco funciones básicas de mantenimiento (limpieza, medición, lubricación, inspección y pequeños ajustes), que le permita ejecutar las actividades con calidad, eficiencia y disponibilidad. El operario debe saber implementar la estrategia de las 5s

(organización, orden, limpieza, estandarización, disciplina).

Esta etapa busca desarrollar mejoras en las actividades de logística y participación de las áreas de soporte administrativo, en este punto se obtiene un 80% de efectividad global del equipo para el proceso productivo o de servicio.

- Utilización de técnicas para mejorar la confiabilidad. Una herramienta a seguir para el desarrollo de esta etapa es la técnica del MCC (mantenimiento centrado en la confiabilidad).

La realización de esta etapa, contiene un análisis de las consecuencias de la falla en el sistema operacional, en el proceso y en el producto o servicio. Se asocian las técnicas de evaluación en los costos de producción (o generación del servicio), de riesgos a la seguridad y medio ambiente, además, se busca mejorar la ejecución de las actividades de mantenimiento y de esta manera se incrementa la mantenibilidad.

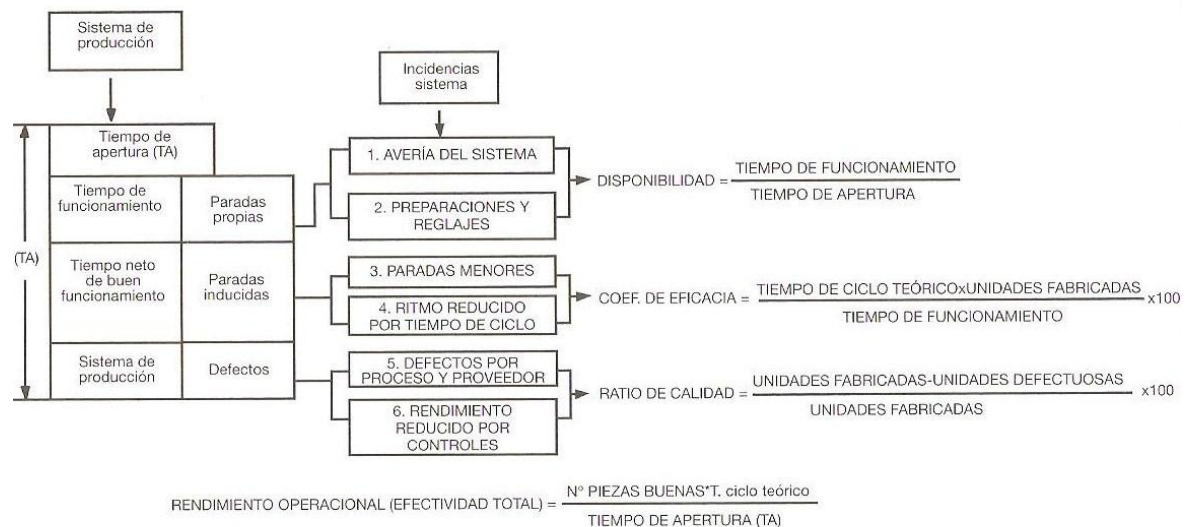
La suma de las características que contiene esta etapa, arroja una efectividad global del equipo (*OEE*) del 85% para el proceso productivo o de servicio.

- Observar la función de mantenimiento como parte del negocio. En esta etapa, el análisis de criterios para mejorar la eficiencia de los equipos y el análisis de actividades basadas en costos, se convierten en un cuello de botella. Se deben determinar aquellos análisis que agregan valor a los procesos o servicios y que formen una relación entre la disponibilidad y la demanda.

La función de mantenimiento define el tipo de intervención más adecuado a aplicar, de forma que los costos sean lo más bajos posibles, además de garantizar el grado deseado de calidad y disponibilidad. De este modo se obtiene un 90% de efectividad global del equipo (*OEE*) para el proceso productivo o de servicio.

La simulación del indicador *OEE* tiene en cuenta sus tres factores disponibilidad, eficiencia y tasa de calidad, para esto se estudian las siete grandes pérdidas del *TPM* y se reparten de acuerdo a cuales de estas afectan determinado factor.

Ilustración 8. Efectividad global de un sistema



Fuente: Sacristan, 2001, 65.

Estas pérdidas son:

- Disponibilidad de los equipos.
- Preparación y ajustes: incluye repuestos, programación, pruebas de

funcionamiento. Esta pérdida también se compone de las fallas en los equipos que contiene averías esporádicas y crónicas.

- Eficiencia de los equipos.
- Inactividad y paradas menores: incluye atascamientos y otras paradas de corta duración, falta de piezas o de un operador, bloqueos, reducción de la velocidad (sea por desgaste del equipo o falta de precisión).
- Calidad.
- Defectos del proceso: este incluye los despericios y la elaboración.
- Otros: pruebas de funcionamiento (Hartmann, 1992, 61).

Se simula el *OEE* en el momento de instalación del equipo y nuevamente durante la producción a fin de determinar la pérdida de producción. La medición de cada una de estas pérdidas establece el *OEE*, sin una identificación adecuada ni una cuantificación de las pérdidas de los equipos, no se puede establecer un programa de *TPM* efectivo.

Un *OEE* aceptable se obtiene a partir del 85%, lo que representa una buena productividad, aunque es poco probable que una cifra como esta se alcance para el total de la planta, pero si puede lograrse para algunas máquinas individuales. Sin embargo, existen empresas que emplean exitosamente la metodología del *TPM* y logran un *OEE* del 50% para toda la planta, esto se logra con una mejora en la eficacia de los equipos y con la reducción de las pérdidas de preparación.

3.8.2 Cálculo de los factores del *OEE*.

El cálculo de los factores que componen el *OEE* ayuda a fijar las prioridades del *TPM*, lo que permite mejorar las máquinas y las líneas de producción a la vez. Fijar las prioridades permite un rápido retorno de la inversión y un incremento del volumen de producción. Estos cálculos ayudan a tomar decisiones correctas para realizar una planificación adecuada, con una obtención del máximo de productividad con los recursos prioritarios que se inviertan (76).

Tabla 3. Pérdidas del *TPM* relacionadas con los factores del *OEE*.

Factores del <i>OEE</i>	Pérdidas del <i>TPM</i>
Disponibilidad	Preparación y ajustes Fallas en los equipos
Eficiencia	Inactividad y paradas menores Fallas ocultas
Calidad	Defectos en el proceso

Fuente: Hartmann, 1992, 60.

Disponibilidad: se determina la disponibilidad planificada por el tiempo de funcionamiento, o se divide el tiempo de operación por el tiempo neto operativo por el tiempo neto operativo restante, de ambas maneras se obtiene el mismo resultado. La disponibilidad de los equipos debe ser superior al 90% (Hartmann, 1992, 69).

- Eficiencia de rendimiento: el punto de partida es el tiempo no operativo, del cual se resta la inactividad, las paradas menores y las pérdidas de velocidad, luego se compara el tiempo operativo resultante con el tiempo operativo neto. Otra forma de calcularlo, es con la multiplicación del tiempo de ciclo teórico por la cantidad de piezas producidas por el tiempo operativo neto, sin embargo se sabe que esta fórmula es difícil de emplear porque no siempre se conoce cuál es el tiempo de ciclo teórico o en ocasiones se procesan diferentes productos que tienen distintos tiempos de ciclos en la misma máquina, esto hace difícil utilizar esta fórmula.

El índice debe ser del 95%, aunque es evidente que esta cifra es difícil de lograr debido a que la eficiencia se ve afectada por la inactividad, las paradas menores y las pérdidas ocultas, que son factores difíciles de controlar.

- Índice de calidad. Se resta la pérdida de tiempo por defectos en las piezas producidas del tiempo operativo utilizable, esto arroja como resultado el tiempo productivo neto. Este tiempo se compara con el tiempo operativo utilizable para establecer el índice de calidad. Este índice debe ser 99%.

El cálculo de este índice cuenta con la ventaja que solo utiliza una unidad de medición de tiempo (se mide en minutos), lo que facilita llevar estos resultados a una computadora para poderlos simular. Otra fórmula que se emplea es comparar la cantidad neta de piezas aceptadas con la cantidad total de piezas producidas (70).

3.9 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

La implementación de la simulación en el mantenimiento, brinda estrategias y permite optimizar las tareas de éste, integrándolo con los procesos de gestión y permite apoyar la toma de decisiones ante situaciones o procesos.

La simulación es una herramienta útil para el mantenimiento.

Las estrategias como *LCC*, el *TPM* y el *CMD*, pueden hacer uso de la simulación para mejorar el proceso de mantenimiento.

4. PRINCIPALES CONCEPTOS DE INDICADORES DE COSTOS EN MANTENIMIENTO

4.1 OBJETIVO

Describir los principales indicadores de costos en mantenimiento relacionados con los tiempos de duración de la parada de los equipos y que sirvan para determinar los costos.

4.2 INTRODUCCIÓN

El desarrollo actual de la industria, ha cambiado totalmente el concepto de reparación. Si el mantenimiento era considerado hasta no hace mucho como una actividad auxiliar cuyo costo siempre parecía excesivo, ahora ha pasado a ser parte integral del proceso productivo y su costo es aceptado como un concepto de los gastos obligados de fabricación.

El costo de mantenimiento tiende a aumentar con la complejidad de la maquinaria empleada y también con el costo de fabricación. El uso de maquinaria de más producción reduce los costos de mano de obra; es importante tener en cuenta el incremento de maquinarias automatizadas en la industria actual, lo cual trae consigo un aumento de personal para mantenimiento. Entre más complicado sea el mecanismo de una máquina, la demanda de personal especializado para mantenimiento es mayor y, por tanto, remunerativo (Ludwig Swärd, 1961, 27).

La importancia de un buen mantenimiento y el efecto del mismo, en la economía global de una empresa, hacen necesario establecer y mantener un estrecho control y una verificación de todas las actividades de mantenimiento. La influencia de este en la productividad de una empresa, así como la eficacia del equipo de mantenimiento, hace que sea esencial el empleo de métodos modernos y se busca controlar y reducir los costos. Desde cualquier punto de vista, el trabajo de mantenimiento siempre tiene que apuntar a una mejora continua para aumentar el rendimiento global de la empresa.

4.3 COMPOSICIÓN DE COSTOS EN MANTENIMIENTO

El costo de los insumos representa la mayor parte de los costos totales en un servicio o producto, incluidas la materia prima y la mano de obra. Hoy en día la automatización de los procesos reemplaza la mano de obra por trabajos realizados por máquinas y robots, esto hace que ya no sea considerada como un valor representativo (Tavares, y otros, 2007, 48).

La estimación de los costos futuros se realiza, con base en técnicas probabilísticas en relación con datos históricos. Dentro de estos costos no programados es posible incluir los llamados costos indirectos relacionados con la pérdida de imagen y reputación debido a las averías y otros tales como los costos de no disponibilidad como un resultado de las pérdidas de beneficio por el hecho de tener la máquina parada (Arsham@, 1996).

El mantenimiento se encuentra dentro de los costos indirectos de una empresa, al igual que el marketing, la logística, el control de calidad, la tecnología, entre otros. Estas aéreas no se consideraban relevantes para la gerencia, lo que las hacía poco atractivas para invertir en ellas, actualmente los equipos de mantenimiento se encargan de mostrar la importancia de estas y se ha cambiado su percepción (Tavares, y otros, 2007, 50).

La prolongación de la vida útil de los equipos se logra mediante reacondicionamientos y reformas de estos, lo que genera unos costos en los activos fijos. Para fines contables los costos pueden ser divididos en inspección, mantenimiento preventivo y correctivo, limpieza y material de oficina. El control de estos costos permite obtener mejores resultados en las actividades desarrolladas por la empresa y generar ganancias de competitividad, agilidad y seguridad en las decisiones.

El mantenimiento busca evitar los daños, defectos y paradas en las máquinas, esto se logra cuando se alcanza un conocimiento de la trazabilidad de la máquina o cuando se encuentra la raíz de la falla. De esta manera el equipo de mantenimiento busca un equilibrio entre los aspectos económico y técnico, para esto emplea metodologías que disminuyan los costos en función de la aplicabilidad en la gestión de los servicios (78).

Tabla 4. Composición de los costos del mantenimiento

Personal	Directos	Salarios y comisiones
	indirectos	Recargos sociales y beneficios (transporte, alimentación, seguro medico, seguro odontológico, habitación, recreación, deportes, auxilios de capacitación, etc.)
	Administrativos	Rateo de los gastos de las áreas de recursos humanos y capacitación, en función de la cantidad de empleados del organo de mantenimiento.
Material	Directos	Costos de reposición de material
	indirectos	Capital inmovilizado, costos de energía eléctrica, almacenaje (instalaciones), agua y personal de depósito.
	Administrativos	Rateo de los gastos de las áreas de compra y administración de material, en función del tiempo de ocupación del personal para la atención al área de mantenimiento.
Contratación	Directos	Costos de los contratos (permanentes y eventuales).
	indirectos	Servicios y recursos utilizados por terceros y costeados por la empresa (transporte, alimentación, instalaciones, etc.)
	Administrativos	Rateo de los gastos de las areas de administración de contratos, financiera y contable, en función de la implicación con los contratos del área de mantenimiento.
Depreciación	Directos	Costos de reposición
	indirectos	Capital inmovilizado
	Administrativos	Rateo de los gastos de las áreas de contabilidad, control de patrimonio y compra en el levantamiento, acompañamiento y adquisición de maquinarias y herramientas para el Area de mantenimiento.
Pérdida de facturación	Directos	Pérdida de producción
	indirectos	Perdida de materia prima, perdida de calidad, devolución y re-proceso.
	Administrativos	Rateo de los gastos de las áreas de control de calidad, ventas, marketing y jurídica, en función de la implicación de vida a mantenimiento.

Fuente: Arcila Restrepo, y otros, 2007, 51

4.4 RECOMENDACIONES PARA REDUCIR COSTOS EN MANTENIMIENTO

Para mejorar la labor del mantenimiento en una empresa se tienen las siguientes recomendaciones:

- Desarrollar la labor de mantenimiento en forma costo eficaz, y medir su desempeño con base a los costos totales de la empresa y su efecto directo en las ganancias.

- Armonizar y adoptar medidas para que las labores de mantenimiento se realicen sin afectar las operaciones, se añaden valor a esta actividad y para cumplir con el objetivo trazado.
- Considerar el uso de equipos o sistemas operativos críticos redundantes. Aunque esto implica una duplicación de activos fijos, mantiene un alto nivel de confiabilidad del sistema.
- Planificar y reducir los tiempos de mantenimiento, y por ende maximizar la disponibilidad productiva de la planta.
- Contar con uno o varios equipos de repuesto, que permitan quitar y poner. Luego del cierre programado, proveer el mantenimiento al equipo removido y tenerlo preparado en caso de necesitarlo.
- Analizar cada uno de los trabajos de mantenimiento para ver qué dificultades se confrontan. Si amerita, proveer accesos adicionales, mejorar las instalaciones para trabajar más rápido y mejor, o para que puedan trabajar varios grupos simultáneamente.
- Realizar pre inspecciones durante cierres parciales cortos o durante cierres no programados, y coleccionar información en cuanto a equipos o componentes averiados que en un futuro requieran mantenimiento o reemplazo. Con esta información se planifican los mantenimientos programados, de tal forma que las compras de repuestos y la asignación de recursos se haga con la debida anticipación, esto evita demoras y plazos indeseables.

- Utilizar las herramientas del mantenimiento predictivo, para realizar reemplazos y mantenimientos menores durante cualquier cierre no programado, de esta manera se evitan fallas imprevistas que pueden resultar costosas y parar la producción en el momento menos adecuado.
- Analizar la causa raíz, investigar los modos probables de falla, rediseñar e implementar mejoras para evitar esos modos de falla.
- Reorientar a la empresa hacia los clientes y buscar eficiencia en costos, en forma rápida y flexible.
- Aceptar que existe la posibilidad de mejorar. Esto implica una actitud proactiva y requiere el aporte del personal involucrado y comprometido con el mantenimiento.
- Luego de cada mantenimiento programado, realizar una reunión de autocrítica para examinar qué cosas se pudieron haber hecho mejor y tomar en cuenta las recomendaciones que se generen en futuros mantenimientos.
- Revisar los procedimientos de compra de equipos críticos, no optar por el precio más bajo, sin tener en cuenta la calidad, ya que esto puede incrementar los costos al final.
- Tomar en cuenta el costo operativo más bajo durante un período a largo plazo para disminuir el costo del ciclo de vida.
- Al momento de realizar compras, mantener la uniformidad de los equipos y componentes. Esto facilita el mantenimiento y permite reducir los requerimientos de capacitación del personal de mantenimiento y las cantidades de repuestos en

bodega.

- Emplear materiales y equipos más duraderos o con valor agregado, para buscar el factor económico, y la rentabilidad de la inversión (Chen@, 2004).

4.5 INDICADORES DE GESTIÓN DE COSTOS DE MANTENIMIENTO

4.5.1 Indicador de costos de mantenimiento por facturación.

Expresa la relación entre el costo total de mantenimiento y la facturación de la empresa en el período considerado.

Sirve para conocer en qué medida se reducen los costos de manteamiento y permite determinar si aumento o disminuyeron estos.

Ecuación 16. Costos de mantenimiento por facturación

$$CMFT = \frac{CTMN}{FTEP}$$

Donde:

- CTMN, Costo total de mantenimiento.
- FTEP, Facturación de la empresa en el período.

Fuente: Moreno G. @, 2008.

4.5.2 Indicador de costos de mantenimiento por producción.

Muestra la influencia que tiene el costo de mantenimiento en el costo final del producto.

Ecuación 17. Costos de mantenimiento en relación a la producción

$$CMRP = \frac{CTMN}{PTPR}$$

Donde:

- PTPR, Producción total en el período.

Fuente: Moreno G. @, 2008.

4.5.3 Indicador de costos de mantenimientos preventivos por mantenimientos totales.

Ecuación 18. Costos de mantenimientos preventivos por mantenimientos totales

$$CPCT = \frac{\text{Costo del mantenimiento preventivo}}{\text{Costos totales de mantenimiento}}$$

Donde:

Costos totales de mantenimiento integra mantenimientos preventivos y correctivos.

Fuente: Moreno G. @, 2008.

Muestra el grado de utilización de técnicas preventivas frente a las correctivas.

Refleja que tanto mantenimiento preventivo se hace con respecto al total.

4.5.4 Indicador del costo de una hora de mantenimiento.

Relaciona el costo de mano de obra de mantenimiento y las horas-hombre invertidas en órdenes de servicio (Tavares, y otros, 2007, 68).

Ecuación 19. Costo de una hora de mantenimiento

$$CHMN = \frac{CMOM}{HHOS}$$

Donde:

- CMOM, Costo de mano de obra de mantenimiento.
- HHOS, Horas hombre invertidas en órdenes de servicio.

Fuente: Tavares, y otros, 2007, 68.

4.5.5 Indicador del componente del costo de mantenimiento.

Ecuación 20. Componente del costo de mantenimiento

$$CCM = \frac{CTMN}{CTPR}$$

Donde:

- CTPR, Costo total de la producción.

Fuente: Tavares, y otros, 2007,69.

Relación entre el costo total del mantenimiento y el costo total de la producción.

4.5.6 Indicador de progreso en los esfuerzos de reducción de costos.

Relación entre el trabajo en mantenimiento programado y el costo de mantenimiento por facturación.

Ecuación 21. Progreso en los esfuerzos de reducción de costos

$$PERC = \frac{TBMP}{CMFT}$$

Donde:

- TBMP, Trabajo en mantenimiento programado.

Fuente: Tavares, y otros, 2007, 69.

4.5.7 Indicador de extensión del mantenimiento correctivo.

Ecuación 22. Extensión del mantenimiento correctivo

$$EXMC = \frac{CDRC}{CDMN}$$

Donde:

- CDRC, Costos directos de las reparaciones correctivas.
- CDMN, costos directos de mantenimiento.

Fuente: Tavares, y otros, 2007, 69.

Relación entre los costos directos de las reparaciones correctivas y los costos directos de mantenimiento.

4.5.8 Indicador de severidad de las reparaciones correctivas.

Relación entre los costos totales directos e indirectos de las reparaciones correctivas y el número total de interrupciones (69).

Ecuación 23. Indicador de severidad de las reparaciones correctivas

$$SVRC = \frac{CTRC}{NTMC}$$

Donde:

- CTRC, Costos totales directos e indirectos de las reparaciones correctivas.
- NTMC, El número total de interrupciones.

Fuente: Tavares, y otros, 2007, 69.

4.5.9 Indicador de inmovilización en repuestos.

Relación entre el capital inmovilizado en repuestos y el capital invertido en equipos (71).

Ecuación 24. Inmovilización en repuestos

$$IMSB = \frac{CISB}{CIEQ}$$

Donde:

- CISB, Capital inmovilizado en repuestos.
- CIEQ, Capital invertido en equipos.

Fuente: Tavares, y otros, 2007, 71.

4.6 CLASIFICACIÓN DE COSTOS DE MANTENIMIENTO

El costo de mantenimiento se encuentra en un rango de porcentaje según el valor de la máquina, este rango está entre el 5 y 12%, sin importar el tipo de procedimiento que se realice sobre esta. Los costos de mantenimiento obligan a la empresa a incurrir en ellos y aunque en porcentaje no son altos, contienen costos fijos, variables, financieros y de falla, que la empresa debe contemplar en sus finanzas.

4.6.1 Costos variables.

Son costos proporcionales a la producción que se realiza, estos abarcan los costos de materias primas energía, embalaje y los variables de mantenimiento (mano de obra directa del mantenimiento correctivo, materiales para el mantenimiento correctivo) (Torres, 2005, 234).

4.6.2 Costos financieros.

Surgen del valor de los repuestos y de las amortizaciones de las máquinas que se encuentran en reserva. Los repuestos que se encuentran en el almacén implican un desembolso de dinero, que se transmiten en liquidez para la empresa, cuando los repuestos tardan en ser utilizados esto se convierte en un costo financiero alto debido a que no se produce ningún beneficio para la empresa.

Dentro de estos costos se incluye lo que cuesta tener máquinas en *stand by* (maquinaria parada para aumentar la disponibilidad), aunque en muchas empresas estos no son tenidos en cuenta.

4.6.3 Costos por falla.

Cuando la empresa presenta pérdidas de beneficio por causa de mantenimiento (pérdidas de materia prima, disminución de la productividad de la mano de obra, pérdidas de energía, rechazos por calidad, entre otros), esto representa los costos por falla (235).

4.6.4 Costos fijos.

Estos costos no dependen del volumen de producción ni de las ventas, aseguran el estado de la instalación a medio y largo plazo. Dentro de estos se encuentran el personal administrativo, de limpieza, la mano de obra indirecta, amortizaciones en instalaciones de producción y costos fijos de mantenimiento (se componen de mano de obra y material para la realización de los mantenimientos predictivo y preventivo) (234).

La toma de decisiones del personal de gestión de mantenimiento tiene en cuenta los efectos costo-efectivos en los que incurren, por ende son precavidos en las decisiones respecto a repuestos en el almacén, a máquinas en stand by, a la

cantidad de mantenimientos preventivos y predictivos que pueden generar aumento en los costos, por ejemplo si se aumentan los preventivos las averías reducen su frecuencia y complejidad, lo que implica una disminución en los costos de los mantenimientos correctivos (237).

Tabla 5. Bloques de costos en el mantenimiento

BLOQUE A	BLOQUE B
MANTENIMIENTO BASADO EN PREVENTIVO	MANTENIMIENTO BASADO EN CORRECTIVO
Mano de obra para mantenimiento preventivo	Mano de obra para mantenimiento correctivo por averías
Mano de obra para mantenimiento programado	Repuestos por averías
Repuestos programados	
Mano de obra indirecta	Costos de fallas
Pinturas, lubricantes, etc.	
Costos financieros	Costos energéticos
Paradas para mantenimiento preventivo	Costos ambientales

Fuente: Torres, 2005, 237.

En la tabla anterior se muestra la relación que existe entre los mantenimientos preventivo y correctivo, se observa que ambos incurren en costos de mano de

obra. En el bloque B se observa costos totales de falla, que dentro del bloque A incluye la mano de obra indirecta y la materia prima, los costos de repuestos por averías para el mantenimiento correctivo implican lo que es mano de obra de mantenimiento programado y repuestos programados para el mantenimiento preventivo.

4.7 COSTOS DE OPORTUNIDAD Y DE LUCRO CESANTE EN EL MANTENIMIENTO

El costo de lucro cesante afecta de manera directa al mantenimiento correctivo, ya que consiste en la pérdida de un incremento patrimonial neto que se deja de obtener como consecuencia de un incumplimiento o perjuicio ocasionado a un tercero (Robles Diaz@, 2009). De igual forma cuando se habla de un mantenimiento preventivo, no se hace una relación con el costo de lucro cesante, debido a que éste es planeado.

Al momento de decidir cual mantenimiento efectuar, o cuantos preventivos realizar, se incurre en el llamado costo de oportunidad, el cual se entiende como aquel donde se toma una decisión y no otra. El valor que se sacrifica por elegir una alternativa y despreciar la otra, significa que se renuncia al beneficio que ofrece el camino descartado, por consiguiente, siempre que se tome una u otra decisión, se habrá renunciado a las oportunidades y posibilidades que ofrecían las otras, que bien pueden ser mejores o peores. (Gerencie@, 2008).

4.8 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En cuestión de mantenimiento existen formas de predecir los costos, sin embargo, en la práctica muchos de éstos llegan sin previo aviso, lo que determina una buena o mala gestión de mantenimiento.

El mantenimiento de los sistemas y sus equipos, representa una inversión, que a mediano y largo plazo genera ganancias y mejoras en la producción, manifestándose en ahorros para la empresa. Por esto es importante hacer seguimiento a los costos por medio de indicadores.

5. APLICACIÓN A UN CASO INDUSTRIAL

5.1 OBJETIVO

Aplicar a un caso industrial el pronóstico de los indicadores mediante simulación.

5.2 INTRODUCCIÓN

Al obtener un histórico de los datos de los tiempos entre fallas y duración de paradas se busca obtener un ajuste automático de estos para una distribución. Las distribuciones se caracterizan por tener parámetros de ajuste, con los cuales se analiza cada equipo que compone el sistema.

La utilización de un programa estadístico es indispensable para analizar series de datos para determinar el comportamiento de estos en un caso determinado. Una vez preparado el modelo e introducido en el programa, se lleva a cabo la simulación. Finalmente, se analizan los datos obtenidos y se compara el resultado obtenido a través de la simulación con la situación real, de esta manera se verifica que el comportamiento del histórico sea semejante al obtenido. Las comparaciones pueden señalar la solución más conveniente.

Los equipos se encuentran en tres estados operación, reparación y mantenimiento (de inspección o mayor). Cuando el equipo sale del estado de reparación, entra a un estado de operación, del cual puede pasar a estado de mantenimiento o nuevamente a estado de reparación, lo que significa que, siempre hay una

conexión entre reparación y operación o entre mantenimiento y operación, lo que hace que cada vez que un equipo se encuentra en reparación o mantenimiento se genera un costo de intervención.

5.3 DESARROLLO

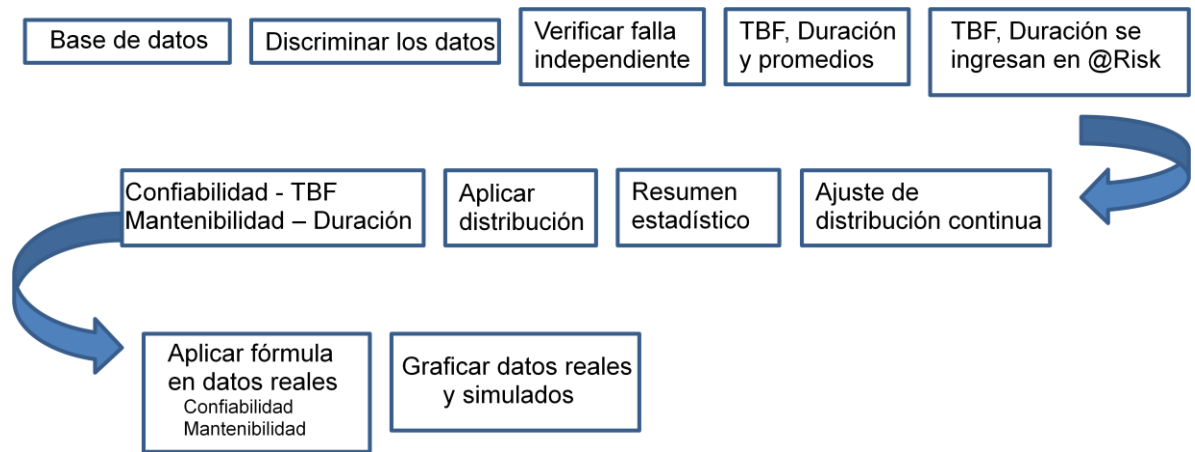
Al pronosticar un sistema compuesto de quince equipos, la gestión de mantenimiento a través de indicadores, se persigue el cumplimiento del objetivo de aplicar dicho pronóstico a un caso industrial mediante simulación. Se analizan datos basados en el comportamiento de un sistema y sus equipos estudiados bajo un modelo de unidad funcional; por esto se presentan diversos tiempos entre fallas y duraciones de fallas, que se desarrollan a lo largo del proyecto.

La unidad con la que se trabaja, se interpreta a partir del funcionamiento o falla de ésta, cuando uno de los sistemas falla, no se detiene el equipo, ya que el sistema se reemplaza de forma inmediata. En este caso se analiza el sistema a partir de sus equipos y también en forma global.

El sistema cuenta con quince equipos que lo conforman, donde en un principio se analizan por separado. Cada sistema proporciona su respectiva serie de datos, los cuales se organizan para ser analizados y obtener los resultados adecuados.

A continuación se observan una serie de actividades que se tuvieron en cuenta para determinar la confiabilidad y mantenibilidad de los equipos.

Ilustración 9. Metodología para determinar confiabilidad y mantenibilidad



Fuente: autoría propia

La base de datos organizada ofrece la posibilidad de hacer el cálculo de tiempo entre fallas y duración de la parada. Esta operación se realiza en días, para esto todas las fechas tenidas en cuenta se toman en estas mismas unidades.

Seguido de esto, se verifica que cada falla sea independiente, es decir, que la fecha de inicio de avería sea menor que la fecha de fin de avería. Una vez calculados estos dos datos, se encuentran los promedios respectivos.

Tabla 6. Base de datos del Equipo 8

Inicio avería	INICIO EN DIAS	Hora ini-avería	Fin de avería	HoraFin avería	Parada	FALLO INDEPENDIENTE	Tpo entre fallos
1/27/2003	0.00	11:00:00	1/27/2003	12:00:00		FALLO INDEPENDIENTE	0.00
3/11/2003	43.00	14:30:32	3/11/2003	15:20:00		FALLO INDEPENDIENTE	1034.51
3/19/2003	51.00	15:44:13	3/19/2003	16:40:00		FALLO INDEPENDIENTE	192.40
6/13/2003	137.00	15:00:00	6/13/2003	16:00:00		FALLO INDEPENDIENTE	2062.33
8/3/2003	188.00	17:00:04	8/3/2003	18:00:00		FALLO INDEPENDIENTE	1225.00
8/7/2003	192.00	11:00:00	8/7/2003	12:00:00		FALLO INDEPENDIENTE	89.00
8/18/2003	203.00	16:00:00	8/18/2003	17:00:00		FALLO INDEPENDIENTE	268.00
8/23/2003	208.00	11:29:57	8/23/2003	12:00:00		FALLO INDEPENDIENTE	114.50
8/25/2003	210.00	11:36:26	8/25/2003	13:00:00		FALLO INDEPENDIENTE	47.61
9/4/2003	220.00	13:02:48	9/4/2003	14:00:00		FALLO INDEPENDIENTE	240.05
9/17/2003	233.00	14:47:00	9/24/2003	05:00:00	X	FALLO INDEPENDIENTE	312.78
10/2/2003	248.00	21:06:25	10/3/2003	02:00:00	X	FALLO INDEPENDIENTE	208.11
10/18/2003	264.00	10:54:13	10/18/2003	11:45:00		FALLO INDEPENDIENTE	368.90
1/28/2004	366.00	11:00:00	1/28/2004	12:00:00		FALLO INDEPENDIENTE	2447.25
4/13/2004	442.00	17:38:00	4/14/2004	05:00:00	X	FALLO INDEPENDIENTE	1829.63
4/26/2004	455.00	08:00:00	4/26/2004	09:00:00		FALLO INDEPENDIENTE	291.00
4/27/2004	456.00	02:00:00	5/1/2004	13:00:00	X	FALLO INDEPENDIENTE	17.00
6/4/2004	494.00	03:00:00	6/4/2004	12:00:00	X	FALLO INDEPENDIENTE	806.00
11/6/2004	649.00	17:59:00	11/6/2004	18:30:00		FALLO INDEPENDIENTE	3725.98
11/10/2004	653.00	06:00:00	11/10/2004	07:00:00		FALLO INDEPENDIENTE	83.50
11/12/2004	655.00	07:00:00	11/12/2004	08:00:00		FALLO INDEPENDIENTE	48.00
1/14/2005	718.00	17:16:00	1/14/2005	18:00:00		FALLO INDEPENDIENTE	1521.27
1/25/2005	729.00	14:06:00	1/25/2005	18:00:00		FALLO INDEPENDIENTE	260.10
2/1/2005	736.00	17:00:00	2/1/2005	18:00:00		FALLO INDEPENDIENTE	167.00
10/6/2005	983.00	07:01:00	10/6/2005	09:00:00	X	FALLO INDEPENDIENTE	5917.02
1/20/2006	1089.00	23:40:00	1/21/2006	04:30:00	X	FALLO INDEPENDIENTE	2558.67

Fuente: autoría propia

Las ecuaciones que se muestran a continuación indican el cálculo del tiempo entre fallas y la duración de la parada, tomadas en días para fines de análisis posteriores.

Ecuación 25. Tiempo entre fallas en días

$$TBF_{días} = [(Inicio\ falla + Hora\ Inicio) - (Fin\ falla + Hora\ fin\ falla)_{Anter}] * 24$$

Donde,

- Anter: indica que se toman los datos anteriores a la fecha en la cual se hacen los cálculos.

Fuente: autoría propia

Ecuación 26. Duración de la parada

$$Duración_{días} = [(Inicio\ falla + Hora\ Inicio) - (Fin\ falla + Hora\ fin\ falla)] * 24$$

Fuente: autoría propia

5.3.1 Supuestos del análisis de datos.

Los supuestos que se toman en cuenta a la hora de realizar el análisis de los datos son los siguientes:

- Los sistemas funcionan 24 horas.
- Los equipos se encuentran en serie, lo que quiere decir que, la falla de cualquiera de ellos repercute en todo el sistema.

- Los datos de costos se trabajan en moneda con base en un año, es decir, no se tiene en cuenta la inflación, ni ningún otro tipo de tasa de descuento.
- La duración de la parada incluye la reparación, los retrasos logísticos y administrativos.
- El supuesto de costos es de acuerdo a los datos dados por la empresa, donde cada hora de mantenimiento correctivo cuesta en promedio \$90.000 y de mantenimiento preventivo \$370.000.

5.3.2 Pasos para determinar las distribuciones.

El primer paso para realizar el diagnóstico es tomar una base de datos de un sistema específico, la cual cuenta con la información necesaria para calcular el tiempo de funcionamiento y los tiempos de fallas de cada equipo que lo componen. Como segunda medida, se observan en detalle los datos y se discriminan aquellos que se encuentran mal introducidos o que no cumplen con algunos de los supuestos (órdenes abiertas, fechas incoherentes, órdenes repetidas, etc.).

Los datos se analizan por medio de un software estadístico, llamado Palisade, del cual se toma el @RISK como herramienta de integración con Excel.

El ajuste automático de los datos para distribución continua es lo que se busca realizar. Cada distribución se caracteriza por unos parámetros, los cuales sirven de base para la etapa de simulación. Mediante una prueba de ajuste, en este caso se emplea Chi-cuadrado, se someten los datos a un análisis, del cual se obtiene el resumen estadístico. De dicho resumen se extraen los parámetros y la distribución que mejor se acomoda a cada serie de datos y se tabula para efectos de

visualización (Ver Tablas 6 y 7).

Tabla 7. Tiempo entre fallas

Tiempo entre fallas					
Sistema	Distribución	Parametro 1	Parametro 2	Parametro 3	Riesgo
Equipo 1	InvGauss	1268,3	856,45		-81,496
Equipo 2	InvGauss	61577	303,01		-42,98
Equipo 3	Expon	2469,7			-123,48
Equipo 4	InvGauss	959,28	1293,29		-99,035
Equipo 5	InvGauss	707,85	701,7		-104,61
Equipo 6	Expon	2472,9			-99,647
Equipo 7	InvGauss	753,79	443,95		-43,193
Equipo 8	InvGauss	2880,3	5577,5		-623,51
Equipo 9	InvGauss	1240,5	982,51		-94,774
Equipo 10	Gamma	0,76406	296,68		0,51861
Equipo 11	Erlang=Gamm	1	436,8		
Equipo 12	Expon	1523,7	-31,152		
Equipo 13	BetaGeneral	0,5795	3,0271	3927,7	
Equipo 14	InvGauss	649,9	697,6		-66,266
Equipo 15	Expon	2550,3	172,77		
Equipo 16	Normal	4380	500		
Equipo 17	Normal	43800			

Fuente: autoría propia.

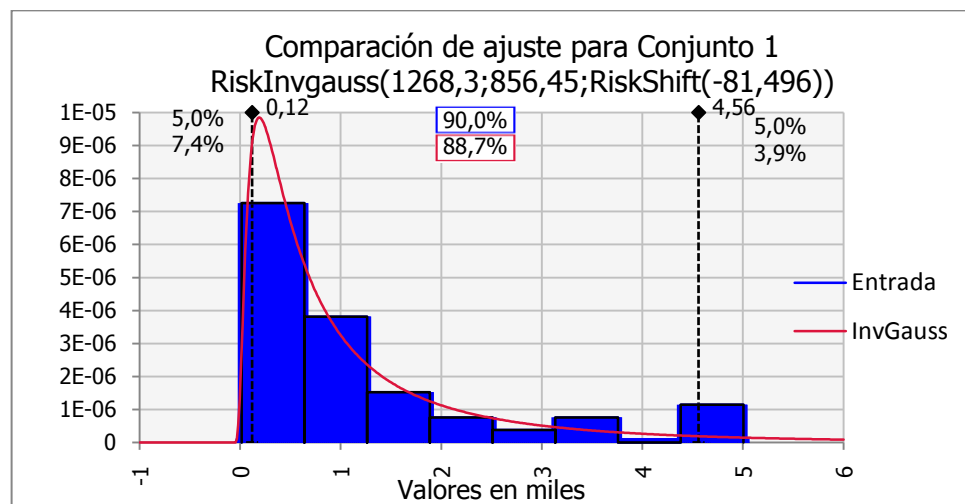
Con la herramienta @RISK se determinan los parámetros de ajuste de los datos y son plasmados en una gráfica para efectos de visualización. A continuación se muestra el ejemplo de un equipo, el cual describe un ajuste de Gauss inversa con los parámetros (1268,3: 856,46: Risk: -81,496), donde el riesgo es un parámetro de posición, el cual depende del tipo de distribución, muestra el tiempo a partir del cual empieza a funcionar la curva. Un riesgo positivo desplaza la curva hacia la derecha, mientras que el negativo la desplaza a la izquierda.

En una distribución normal este riesgo no tiene sentido porque su gráfica no se

puede desplazar a la derecha o a la izquierda.

Los datos generan el histograma de frecuencias, en el cual se comparan los datos reales con una distribución teórica. En la gráfica se muestra una línea roja que indica la distribución teórica que mejor se ajusta.

Ilustración 10. Ejemplo de tiempo entre fallas del equipo 1, por medio del programa @RISK



Fuente: @RISK

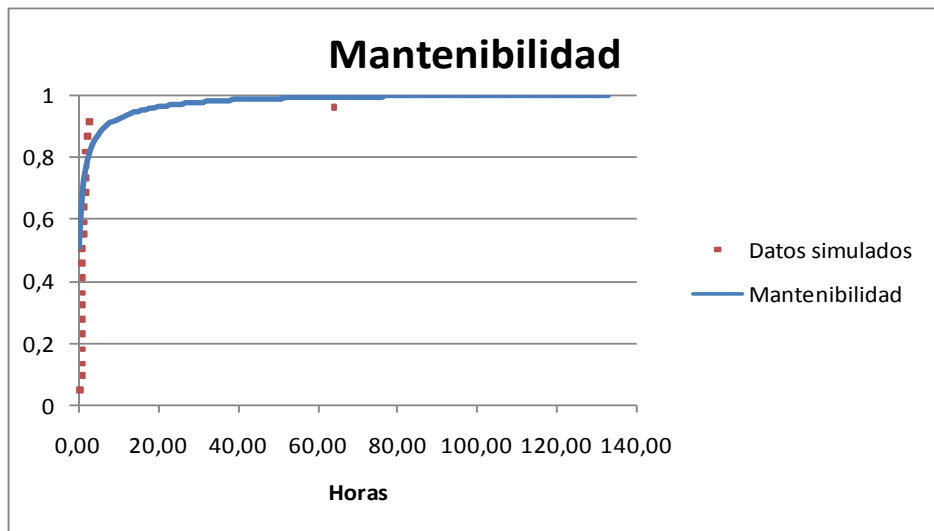
Tabla 8. Duración de la parada

Duración de la parada				
Sistema	Distribución	Parametro 1	Parametro 2	Riesgo
Equipo1	Gauss inversa	19,543	0,56475	0,43437
Equipo2	InvGauss	10,043	0,5177	0,42498
Equipo3	InvGauss	39,403	0,88829	0,09976
Equipo4	InvGauss	49,785	1,3028	0,070255
Equipo5	InvGauss	15,896	0,7079	0,34347
Equipo6	Gamma	0,21219	53,671	0,98472
Equipo7	InvGauss	22,466	1,1522	0,066481
Equipo8	InvGauss	3,7252	0,37576	0,69642
Equipo9	InvGauss	4,9361	0,95637	0,033999
Equipo10	InvGauss	10,543	1,3491	-0,11387
Equipo11	InvGauss	11,17	1,1642	-0,04294
Equipo12	InvGauss	34,158	0,40981	0,41259
Equipo13	InvGauss	48,999	0,90446	-0,11367
Equipo14	InvGauss	43,595	1,5709	-0,15513
Equipo15	InvGauss	30,219	1,1719	0,0014911
Equipo16	Normal	10	2	
Equipo17	Normal	168	48	

Fuente: autoría propia

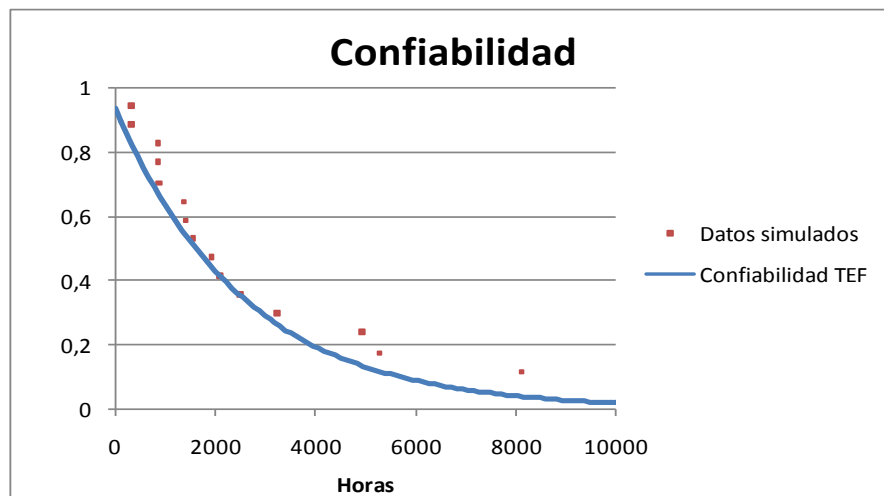
El siguiente paso es aplicar a cada equipo la distribución correspondiente, de acuerdo a los parámetros arrojados por medio de la herramienta de análisis @RISK. Con estos datos se obtiene la confiabilidad, a partir del *TBF* y se determina una gráfica cóncava decreciente, lo que quiere decir que, los valores se acercan cada vez más a cero. De igual forma, se trabaja con los datos de duración de la parada para determinar la gráfica de mantenibilidad, la cual es convexa creciente con tendencia a estabilizarse.

Gráfica 14. Ejemplo de mantenibilidad del equipo 8



Fuente: autoría propia

Gráfica 15. Ejemplo de confiabilidad del equipo 11



Fuente: autoría propia

Como paso final, se toman los datos reales organizados de manera ascendente para aplicarles la fórmula de mantenibilidad y confiabilidad, según corresponda, luego se gráfica la nueva serie de datos (correspondiente a los valores reales) sobre la gráfica anterior respectiva y se observa una semejanza entre ambas.

5.3.3 Pasos para determinar los costos.

Como primera medida se tienen en cuenta los costos asociados a reparación, a mantenimiento de inspección y a mantenimientos mayores. Estos costos se analizan a partir de una muestra de datos y se modelan con distribución normal.

Los valores promedios de costo por hora por reparación, costo por hora por inspección y costo por hora de mantenimiento mayor, se obtienen con la fuente histórica de datos. Como se muestra a continuación en las tablas 9 y 10.

Los datos se analizan en horas por medio del tiempo real que es acumulado hasta llegar al número de horas que equivalen a 10 años, que es igual a 87600 horas. Luego se separan los valores de los costos por años y se determina un valor promedio. Este procedimiento se lleva a cabo para cada una de las simulaciones, lo que significa, que con los datos obtenidos en cada simulación se determina un valor promedio que finalmente es promediado por años para llegar a un único valor.

Tabla 9. Promedios de mantenimientos correctivos

MANTENIMIENTOS CORRECTIVOS					
		SIMULACIÓN 1	SIMULACIÓN 2	SIMULACIÓN 3	SIMULACIÓN 4
Años	Horas reales	Costos Promedios	Costos Promedios	Costos Promedios	Costos Promedios
1	8760	\$ 2.015.272,21	\$ 1.808.704,59	\$ 2.147.013,37	\$ 836.776,76
2	17520	\$ 1.524.759,40	\$ 1.467.978,48	\$ 1.265.735,60	\$ 2.000.574,41
3	26280	\$ 2.345.190,85	\$ 928.709,44	\$ 1.154.443,67	\$ 779.932,59
4	35040	\$ 957.640,50	\$ 3.280.445,90	\$ 661.807,72	\$ 1.502.056,02
5	43800	\$ 1.390.282,88	\$ 9.468.954,50	\$ 833.671,25	\$ 1.348.361,69
6	52560	\$ 1.721.451,32	\$ 1.176.773,79	\$ 2.003.332,22	\$ 1.652.698,70
7	61320	\$ 939.100,97	\$ 2.667.955,78	\$ 834.397,64	\$ 2.294.557,99
8	70080	\$ 1.077.732,30	\$ 2.236.339,01	\$ 3.503.055,43	\$ 4.723.057,10
9	78840	\$ 1.710.699,81	\$ 1.314.444,92	\$ 685.833,81	\$ 11.010.781,73
10	87600	\$ 950.644,62	\$ 13.430.208,23	\$ 732.075,44	\$ 2.721.859,14

Fuente: autoría propia

Tabla 10. Promedios de mantenimientos preventivos

MANTENIMIENTOS PREVENTIVOS					
		SIMULACIÓN 1	SIMULACIÓN 2	SIMULACIÓN 3	SIMULACIÓN 4
Años	Horas reales	Costos Promedios	Costos Promedios	Costos Promedios	Costos Promedios
1	8760	\$ 3.788.434,93	\$ 4.271.524,06	\$ 5.294.911,33	\$ 3.409.112,29
2	17520	\$ 4.142.313,60	\$ 3.986.314,81	\$ 3.921.476,00	\$ 4.532.425,53
3	26280	\$ 3.988.651,30	\$ 3.995.897,92	\$ 3.887.538,20	\$ 3.871.346,44
4	35040	\$ 3.993.454,46	\$ 3.664.405,00	\$ 4.331.574,78	\$ 3.197.096,39
5	43800	\$ 3.384.644,13	\$ 4.634.686,44	\$ 5.279.368,28	\$ 4.547.335,61
6	52560	\$ 8.327.857,52	\$ 3.309.352,74	\$ 3.961.236,04	\$ 4.504.113,22
7	61320	\$ 3.628.390,12	\$ 8.721.612,46	\$ 2.343.884,44	\$ 9.949.333,70
8	70080	\$ 4.370.498,30	\$ 3.532.268,42	\$ 7.565.187,06	\$ 1.607.213,20
9	78840	\$ 2.973.793,04	\$ 3.688.512,15	\$ 2.702.635,01	\$ 4.051.329,10
10	87600	\$ 4.583.439,71	\$ 3.910.983,10	\$ 3.847.627,20	\$ 2.932.462,19

Fuente: autoría propia

En las tablas 9 y 10, se muestran los promedios obtenidos para cada año en las diferentes simulaciones.

La búsqueda de probabilidad y variable se hace mediante la transformación de la distribución y la búsqueda aleatoria de la probabilidad respecto a la variable, esto

lo hacen posibles los parámetros de ajuste. Se logra al generar una probabilidad de *TBF* o duración de la falla, más la siguiente inspección, más el siguiente mantenimiento mayor. Hay que tener en cuenta que las inspecciones no afectan a todos los equipos.

El siguiente paso es generar una serie de eventos y aquí se conoce cual sistema va a fallar primero, este resultado se rota y se acumula durante un tiempo determinado. El equipo en este momento se encuentra en alguno de estos tres estados, operación, reparación o mantenimiento. Luego, se determina cual evento (tiempo entre fallas, inspección o mantenimiento mayor), se presenta y cuanto se demora.

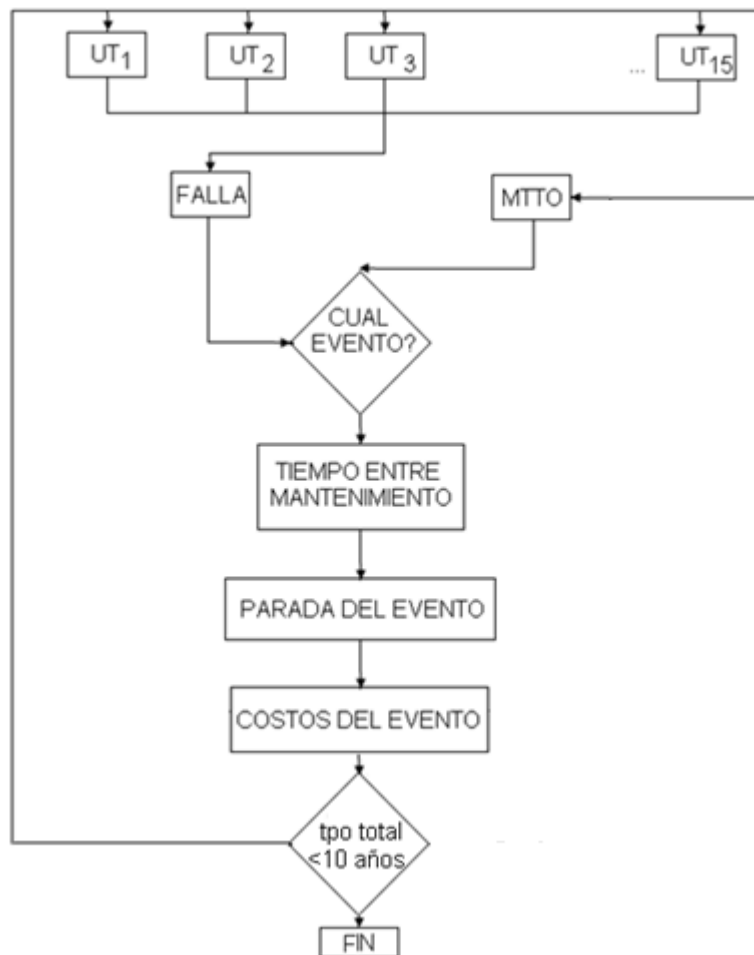
Como paso final, cada vez que el equipo se encuentra en reparación o mantenimiento se genera un costo, denominado costo de intervención. Con esta información, se simulan ambos (reparaciones y mantenimientos), y en este momento, es cuando se verifica que se tenga un comportamiento aproximado del histórico.

5.3.4 Pasos desarrollados para cumplir la etapa de simulación que se le aplica a los datos analizados.

Se tienen los quince equipos en igualdad de condiciones, cada uno genera un *UT(Up time)*, en este punto se crea la expectativa acerca de cuál de los eventos va a presentarse primero (tiempo entre fallas, inspección o mantenimiento mayor), luego se determina el tiempo entre mantenimiento *MTBM* (Sea porque se presento mantenimiento correctivo o preventivo), aquí se registra la parada del evento.

Como se había explicado en párrafos anteriores, toda parada trae consigo un costo, por lo cual en este momento es cuando se determinan los costos del evento, este ciclo se repite mientras el tiempo acumulado sea menor a 10 años (87600 horas).

Ilustración 11. Pasos para realizar el proceso de simulación



Fuente: autoría propia

5.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

La simulación es una herramienta para conocer el impacto de los cambios en los procesos sin necesidad de llevarlos a cabo a la realidad, de ésta se extrae información que sirve para apoyar la toma de decisiones.

El hecho de llevar a cabo un proceso de simulación, implica el conocimiento de cada uno de los pasos que requiere el proceso de simulación, además, es necesario conocer el sistema a simular o contar con la colaboración de expertos.

Al trabajar con una base de datos de un sistema que en un principio se desconoce, lleva consigo unas investigaciones previas.

6. ANÁLISIS DE DATOS OBTENIDOS MEDIANTE LA SIMULACIÓN

6.1 OBJETIVO

Analizar los resultados obtenidos y su importancia para el grupo de investigación.

6.2 INTRODUCCIÓN

El analizar los datos arroja resultados con los cuales se facilita la solución de problemas. Una serie de datos se analiza con el fin de verificar de forma racional un problema que se tiene o se quiere identificar.

El análisis de datos permite visualizar los posibles percances de un problema, para poder tomar decisiones acertadas.

6.3 DESARROLLO

6.3.1 Análisis de los indicadores con distribuciones.

A continuación se muestra el resultado obtenido al comparar los datos reales del tiempo entre fallas y de la duración de la parada con los mismos datos logrados por medio de la simulación.

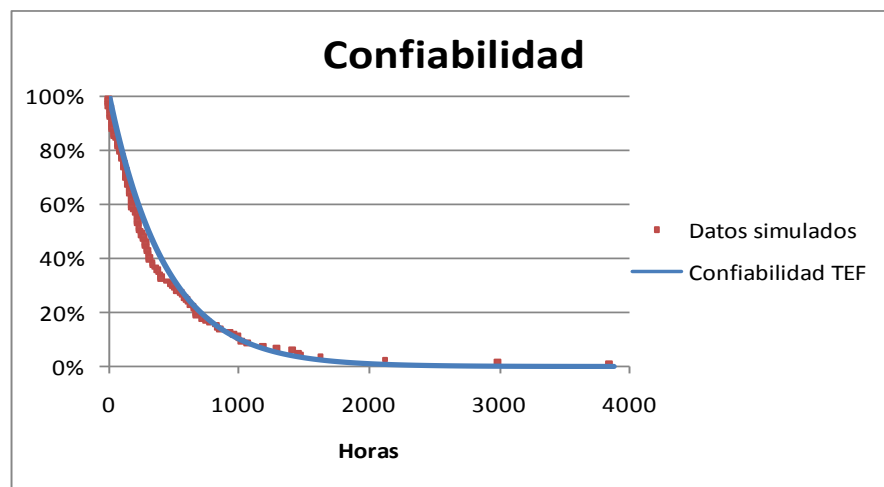
Al comparar ambas series de datos se obtienen indicios de las diferencias reales entre los dos sistemas (real y simulado). En las comparativas realizadas se tienen en cuenta cada uno de los equipos, con sus respectivas series de datos.

Las simulaciones se basan en los históricos de falla de los equipos, lo que quiere decir que, se genera la secuencia de fallas de cada uno de ellos dentro del

sistema. Se simula por un periodo de tiempo de 10 años, a partir de una base de datos obtenida mediante el seguimiento realizado a cada equipo.

Ambas gráficas muestran que el comportamiento de la serie de datos dado a través del proceso de simulación asemeja a la serie de datos reales, es decir, las dos series describen una trayectoria similar.

Gráfica 16. Ejemplo de confiabilidad de datos reales y simulados del equipo 11



Fuente: autoría propia

En la gráfica se observa que el 40% de la veces, el equipo 11 alcanza un periodo de funcionamiento libre de fallas de 400 horas, lo que significa, la probabilidad que alcanza por horas de funcionamiento sin que el equipo falle es del 40%. También se observa que únicamente el 1% de las veces que el equipo entra en funcionamiento, lo hace por un periodo de menos de 2000 horas libre de fallas.

En la tabla 11 se comparan los equipos en un periodo de 1000 horas de funcionamiento, esto es con el fin de encontrar cual de los 15 equipos es el mas confiable para trabajar durante este periodo de tiempo.

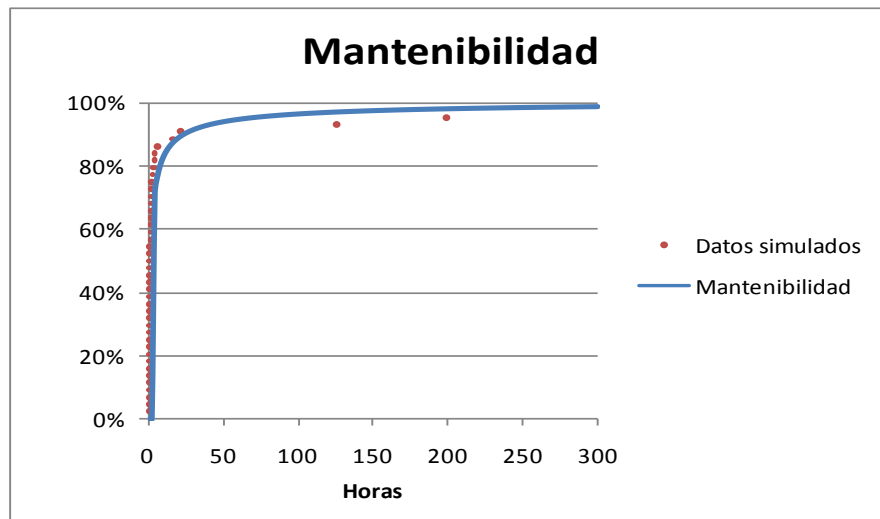
Tabla 11. Comparativo de confiabilidad en un tiempo de 1000 horas

EQUIPO MÁS CONFIABLE		
	Tiempo en horas	Porcentaje
Equipo 1	1000	42%
Equipo 2	1000	31%
Equipo 3	1000	70%
Equipo 4	1000	38%
Equipo 5	1000	24%
Equipo 6	1000	69%
Equipo 7	1000	23%
Equipo 8	1000	99,9%
Equipo 9	1000	44%
Equipo 10	1000	2%
Equipo 11	1000	10%
Equipo 12	1000	53%
Equipo 13	1000	0%
Equipo 14	1000	20%
Equipo 15	1000	63%

Fuente: autoría propia

En la tabla de confiabilidad, se puede determinar que el equipo mas confiable para un periodo de tiempo de 1000 horas de trabajo es el equipo 8, el cual presenta una confiabilidad del 99,9%, para este determinado valor de tiempo, seguido por el equipo 3 con una confiabilidad del 70%. También se destaca el equipo 13, por su nulo valor de confiabilidad, pues se puede observar que para este lapso de tiempo su confiabilidad es de 0%, seguido por el equipo 10 con un valor de 2%.

Gráfica 17. Ejemplo de mantenibilidad de datos reales y simulados del equipo 1



Fuente: autoría propia

En la gráfica de mantenibilidad perteneciente al equipo 1, se observa que el 71% de las veces que se realiza una acción de mantenimiento correctivo, este equipo demora menos de 2 horas.

La siguiente tabla muestra la mantenibilidad de cada uno de los equipos analizada en un periodo de 2 horas, este análisis da como resultado cual de todos los equipo es el que cuenta con la mayor mantenibilidad, lo que significa cuál es el más mantenible.

Tabla 12. Comparativo de mantenibilidad en un tiempo de 2 horas

EQUIPO MÁS MANTENIBLE		
	Tiempo en horas	Porcentaje
Equipo 1	2	56%
Equipo 2	2	68%
Equipo 3	2	53%
Equipo 4	2	44%
Equipo 5	2	61%
Equipo 6	2	59%
Equipo 7	2	48%
Equipo 8	2	78%
Equipo 9	2	59%
Equipo 10	2	45%
Equipo 11	2	49%
Equipo 12	2	69%
Equipo 13	2	50%
Equipo 14	2	37%
Equipo 15	2	46%

Fuente: autoría propia

La tabla 12 de mantenibilidad se analiza a partir de un tiempo estimado para cada equipo de 2 horas de parada, es así como se logran comparar para este rango de tiempo la mantenibilidad de los equipos (probabilidad de terminar la acción de mantenimiento antes de 2 horas). En la tabla se muestra que el equipo que alcanza un mayor valor es el equipo 8, con un porcentaje alcanzado de 78%, seguido del equipo 12 que tiene una mantenibilidad del 69%. De igual forma, se resaltan los equipos con menor porcentaje de mantenibilidad, los cuales son el equipo 14 con 37%, seguido del equipo 4, el cual presenta un valor de 44% de mantenibilidad.

6.3.2 Análisis de los tiempos promedios

En las tablas 9 y 10 se muestran los promedios de tiempo entre fallas y duración de la parada, respectivamente. Cada conjunto de promedios, fue generado

mediante el proceso de simulación, para luego obtener un promedio único para cada equipo.

En las tablas 12 y 13 se observa una relación entre los valores de los promedios reales y simulados, donde se hace notoria la poca diferencia entre un valor y otro dentro del mismo equipo. Lo que deja ver que el conjunto de datos obtenidos por medio de la simulación, son efectivos a la hora de asemejar los datos reales.

La muestra con la cual se trabaja, pasa por cuatro procesos en los cuales los datos son simulados. El número de simulaciones realizadas, son relativamente pocas lo que impide tener resultados precisos.

Tabla 13. Valores promedios de datos reales y simulados de tiempo entre fallas

Tiempo entre Fallas		
EQUIPO	PROMEDIO REAL	PROMEDIO SIMULACIÓN
1	1130,39	1080,71
2	1534,29	1394,64
3	2352,08	2270,34
4	845,15	920,28
5	603,24	651,93
6	2496,93	2313,94
7	710,60	708,61
8	2256,76	2372,87
9	1145,72	1116,47
10	226,17	233,86
11	436,80	427,18
12	1541,70	1518,44
13	628,00	603,58
14	576,43	674,92
15	2712,89	3020,65
16	5564,88	4348,10
17	40103,35	39501,47

Fuente: autoría propia

Tabla 14. Valores promedios de datos reales y simulados de duración de parada

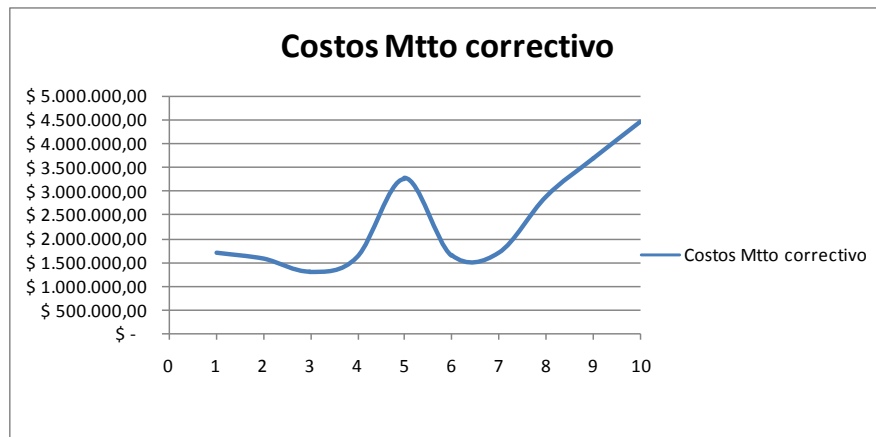
DURACIÓN		
EQUIPO	PROMEDIO REAL	PROMEDIO SIMULACIÓN
1	19,98	13,95
2	10,47	6,67
3	39,50	46,70
4	49,86	37,63
5	16,40	15,20
6	11,83	10,98
7	22,53	28,00
8	4,59	5,15
9	4,97	5,36
10	10,43	9,52
11	11,13	10,04
12	34,57	33,69
13	48,89	40,43
14	43,44	44,63
15	30,22	29,36
16	15,21	10,19
17	190,59	208,34

Fuente: autoría propia

6.3.3 Análisis de los costos de mantenimiento.

Aunque el comportamiento de los costos puede verse afectado por diversos factores, en la gráfica 19 (la cual representa el comportamiento de los mantenimientos preventivos), se observa que el comportamiento del costo año a año se mantiene en una posición relativamente constante respecto a los altibajos de cada año. Mientras que la gráfica que representa los costos de mantenimiento correctivo muestra un comportamiento impredecible, el cual se ve reflejado en la inconstancia de cada año y además, se observa una tendencia ascendente.

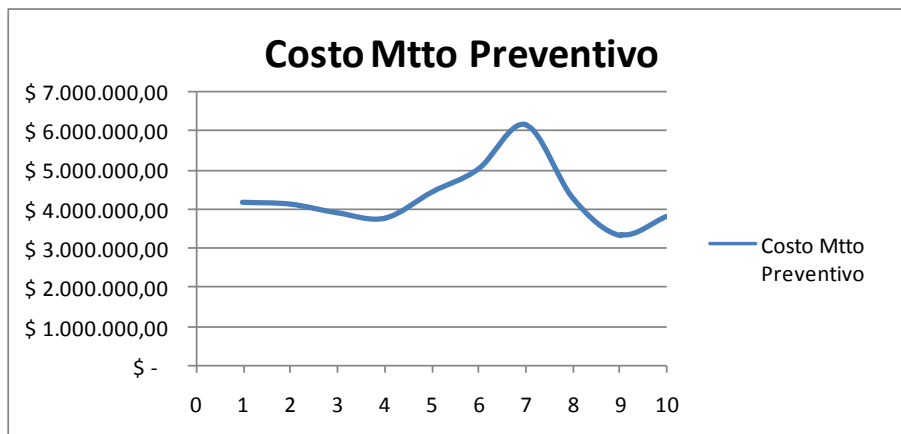
Gráfica 18. Costos de mantenimiento correctivo



Fuente: autoría propia

El pico de la gráfica representa un acumulado de fallas en diferentes equipos, lo que hace que se vea reflejado en un incremento en los costos durante este año. Como es sabido, las fallas imprevistas en los equipos son difíciles de controlar.

Gráfica 19. Costos de mantenimiento preventivo



Fuente: autoría propia

En la gráfica 19 se observa un pico que representa el mantenimiento quinquenal, además entre el período de tiempo que abarca los años 3 y 6, comienza un incremento que representa un acumulado de dos mantenimientos. El análisis de la gráfica muestra que en el año 8 se presentan tres mantenimientos consecutivos en equipos diferentes, lo que hace que este año tenga mayor probabilidad que ocurran varios mantenimientos simultáneamente, al igual que en año 3.

Gráfica 20. Costos totales acumulados



Fuente: autoría propia

De acuerdo a las gráficas de costo de mantenimiento preventivo y correctivo, la gráfica de costos totales muestra periodos en los que la pendiente se aumenta, debido a la suma de los mantenimientos en los años en los que se encuentran los incrementos.

6.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Tanto para el caso de análisis de costos año a año, como para el análisis de confiabilidad y mantenibilidad, se encontró que la simulación es un buen método para predecir ya sea costos o fallas futuras, dado que las series de datos al ser analizadas mediante distribuciones y comparadas con los datos reales, arrojan resultados que se asemejan a la realidad, es decir que de estas simulaciones se obtiene resultados confiables.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 OBJETIVO

Concluir los resultados obtenidos.

7.2 INTRODUCCIÓN

Después del análisis exhaustivo de la información suministrada, se entra a una siguiente etapa, en la cual se organiza la información obtenida, se selecciona y finalmente se llega a un desenlace donde los datos finales son la base para apoyar la toma de decisiones gerenciales.

7.3 CONCLUSIONES DE LA METODOLOGÍA

El permitir construir un programa de intervención preventivo de reposición de las piezas que sufren algún tipo de desgaste, de modo tal que se reemplacen las piezas antes de su desgaste total o rotura, constituye lo que sería un mantenimiento preventivo ideal. De esta forma se lograrían desaparecer las averías de forma definitiva.

El desarrollo de un plan de mantenimiento requiere un seguimiento periódico de la máquina. Es así como se obtiene una base de datos con la cual se calculan los indicadores de gestión y se realiza un reporte periódico que sirva de apoyo al departamento de mantenimiento y las decisiones que en él se tomen.

Al momento de llevar a cabo un proceso de simulación, se cuenta con una base de datos selecta que muestre el comportamiento de cada componente del sistema. Esta base de datos se obtiene al hacerle seguimiento al sistema, los datos se analizan por medio de una distribución.

El análisis de datos permite visualizar los posibles percances de un problema, en los que se realiza la validación de los tiempos entre falla, la duración de la parada y los costos de mantenimiento, para poder tomar decisiones acertadas.

El conocimiento del modelo es un punto fundamental en el cual se tienen en cuenta la base de datos, los eventos y el conocimiento del proceso de simulación, para finamente saber a dónde se quiere llegar.

Al trabajar con el supuesto que los equipos funcionan en serie, indica que se debe prestar atención en la base de datos y demostrar que fallas son independientes (las bases de datos no poseen valores negativos).

7.4 CONCLUSIONES DE LOS DATOS FINALES

Las distribuciones permiten estudiar a través de un registro de fallas, como éstos varían a lo largo del tiempo y dentro de lo que se considera tiempo normal de uso.

Se observa que las distribuciones continuas toman cualquier valor y no un número determinado como ocurre en las distribuciones discretas.

El análisis de la confiabilidad de cada uno de los equipos con el mismo lapso de

tiempo de operación, deja a la vista que el equipo con mayor probabilidad de funcionamiento sin presentar falla es el equipo 8, con una confiabilidad del 99,9%, seguido por el equipo 3 que presenta una confiabilidad del 70%. Es importante enfatizar en el resultado de confiabilidad que se tiene en los equipos 3 y 10, donde el primero tiene una confiabilidad de 0% y el segundo de 2% para el mismo tramo de tiempo que es de 1000 horas (Ver tabla 11).

Para un tramo de tiempo de 2 horas, se encuentra que los equipos 8 y 12, son los que presentan una mayor mantenibilidad, con valores de 78% y 69% respectivamente, mientras que los equipos que presentan un valor en la mantenibilidad mas bajos, son el equipo 14 con un porcentaje de 37% y el equipo 4 que tiene un valor de 44% (Ver tabla 12).

El pico que representa el mantenimiento quinquenal, que se muestra en la gráfica 19, abarca el tramo comprendido entre los años 3 y 6, y por esto ocurre un incremento que representa un acumulado de dos mantenimientos. De acuerdo a la tabla 10, se conoce que en promedio existen 3 mantenimientos consecutivos para el año 8, sin identificar a que equipos le corresponden, lo que hace que este año tenga mayor probabilidad que ocurran varios mantenimientos simultáneamente, al igual que en año 3 en el cual se observa la misma posibilidad.

Las fallas imprevistas en los equipos son difíciles de controlar, esto hace que el mantenimiento correctivo presente un pico que representa un acumulado de fallas en diferentes equipos, lo que hace que se vea reflejado en un incremento en los

costos.

7.5 CONCLUSIONES DEL PROYECTO

Al momento de llevar a cabo cualquier tipo de mantenimiento, se debe tener en cuenta que una reparación rápida y segura se refleja en paros de producción más cortos. Es importante también que el personal cuente con toda la dotación para que pueda desempeñar su labor con rapidez y eficacia.

Las actividades de mantenimiento correctivo se centran en corregir a tiempo la falla con tareas no planeadas durante el funcionamiento de los equipos. Estas medidas traen tiempos de paros con los que no se contaba. Para estudiar su comportamiento se deben llevar registros de este tipo de eventos.

No en todas las ocasiones, es necesario eliminar en su totalidad el mantenimiento correctivo, debido a que las diferentes paradas brindan todo tipo de información que sirve para realizar reparaciones de manera definitiva. La participación de mantenimientos correctivos y preventivos genera un aumento en la disponibilidad y disminución de los costos.

Muchas estrategias de mantenimiento implementan técnicas relacionadas con los procesos de simulación, pues de esta manera se toman mayores precauciones en la toma de decisiones.

Entre las prioridades que debe tener en cuenta una buena gestión de

mantenimiento, es incluir los costos generados en cada parada (sea por mantenimiento correctivo o preventivo). Es así como se logra optimizar la disponibilidad de los equipos, se logra hacer un balance entre el mantenimiento y su correspondiente lucro cesante, se evitan accidentes y se prolonga la vida útil de los sistemas y sus equipos, entre otros.

7.6 RECOMENDACIONES

La muestra con la cual se trabaja, pasa por cuatro procesos en los cuales los datos son simulados. El número de simulaciones realizadas, son relativamente pocos lo que impide tener resultados más precisos.

Tener una base de datos organizada con tiempos y costos.

Una vez realizado el análisis de los resultados, es necesario efectuar toda la documentación del modelo. Esta documentación es importante, porque permite el uso del modelo generado en caso que se requieran ajustes futuros. En ella se deben incluir los supuestos del modelo, las distribuciones asociadas a sus variables, todos sus alcances y limitaciones y, en general, la totalidad de las consideraciones de programación. También se incluyen sugerencias tanto del uso del modelo como de los resultados obtenidos, para realizar un reporte completo.

BIBLIOGRAFÍA

Anderson, David R., Sweeney, Danis J. y Williams, Thomas A. 2004. *Métodos cuantitativos para los negocios.* s.l. : THOMSOM, 2004. ISBN: 970-686-372-9.

Arcila Restrepo, Santiago y Velez Muñoz, Sebastian. 2007. *Aplicacion de un sistema de costeo en el mantenimiento de una planta manufacturera local.* Medellin : EAFIT, 2007.

Arias@, Laura. 2003. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lii/arias_s_II/. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lii/arias_s_II/. [En línea] 21 de Abril de 2003. [Citado el: 26 de Junio de 2009.] http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lii/arias_s_II/capitulo3.pdf.

Arsham@, Hossein. 1996. <http://home.ubalt.edu/>. <http://home.ubalt.edu/>. [En línea] 25 de 2 de 1996. [Citado el: 2009 de Junio de 25.] <http://home.ubalt.edu/ntsbarsh/opre640S/SpanishP.htm>.

Askarate@, Ander, y otros. 2005. www.prolima.net. www.prolima.net. [En línea] 2005. [Citado el: 26 de Junio de 2009.] www.prolima.net/Dissemination-en/conferences-en/xvicongreso.

Chen@, Marco A. 2004. <http://www.copimerainternacional.org/>. <http://www.copimerainternacional.org/>. [En línea] 2004. [Citado el: 15 de Julio de 2009.] http://www.copimerainternacional.org/publicaciones/revista_techno/ing_mant/1_red_ucir.pdf.

Chiguagua@. 2007. <http://www.itch.edu.mx/>. <http://www.itch.edu.mx/>. [En línea] Noviembre de 2007. [Citado el: 18 de Junio de 2009.] http://www.itch.edu.mx/academic/industrial/sabaticorita/_private/03Distribucion%20

Exponencial.htm.

Cmapspublic@. 2007. [cmapspublic.ihmc.us/rid. *cmapspublic.ihmc.us/rid*](http://cmapspublic.ihmc.us/rid.cmapspublic.ihmc.us/rid). [En línea] 2007. [Citado el: 17 de Junio de 2009.]

cmapspublic.ihmc.us/rid=1183171901733_1152347640_8714/Distribución%20lognormal.doc.

COLAS@. 2009. WIKIPEDIA. *WIKIPEDIA*. [En línea] 2009. [Citado el: 26 de Junio de 2009.] http://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa_de_colas.

Commons@, Wikimedia. 2008.

http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Probability_distributions. http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Probability_distributions. [En línea] 23 de Agosto de 2008. [Citado el: 19 de Junio de 2009.]

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lognormal_distribution_CDF.png.

Dyner R., Isaac, Peña Z., Gloria Elena y Arango A., Santiago. 2008. *Modelamiento para la simulación de sistemas socio-económicos y naturales*. Medellín : Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, 2008. ISBN: 978-958-728-001-2.

Estévez Pérez@, Graciela y Quintela Del Rio, Alejandro. 2001.

<http://www.idescat.cat/sort/questio/>. *Idescat*. [En línea] Octubre de 2001. [Citado el: 30 de Junio de 2009.]

<http://www.idescat.cat/sort/questio/questiopdf/25.3.3.Estevez.pdf>.

Fernandez@, Leoncio Hertz. 2009. El prisma. *El prisma*. [En línea] 2009. [Citado el: 26 de Junio de 2009.]

http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_industrial/teoriadecolaslineasdeespera/default.asp.

Gamboa@, Ada Elizabeth. 2006. Industrialtijuana.com. *Industrialtijuana.com*. [En línea] 2006. [Citado el: 11 de Junio de 2009.] http://cmapspublic.ihmc.us/rid=1183171890702_1046873535_8708/Distribuciones%20continuas.doc..

Garcia Dunna, Eduardo. 2006. *Simulacion y analisis de sistemas con Promodel*. Mexico : Pearson Educacion, 2006. ISBN: 970-26-0773-6.

García Palencia, Oliverio. 2003. <http://www.noria.com/sp/home.asp>. <http://www.noria.com/sp/home.asp>. [En línea] 30 de Octubre de 2003. [Citado el: 26 de Junio de 2009.] <http://www.noria.com/sp/cmcm/2k3/oliverio.pdf>.

García@, Santiago. 2008. Renovetec. *Renovetec*. [En línea] 2008. [Citado el: 7 de Junio de 2009.] <http://www.renovetec.com/indicadores.html>.

Gerencie@. 2008. www.Gerencia.com. *www.Gerencia.com*. [En línea] 28 de Agosto de 2008. [Citado el: 23 de Julio de 2009.] <http://www.gerencia.com/costo-de-oportunidad.html>.

Hartmann, Edward H. 1992. *Mantenimiento productivo total: Como instalar con exito el TPM en una planta no japonesa*. Pennsylvania : International TPM institute, Inc, 1992. ISBN: 1-882258-01-0.

Holguín Duarte, Juan Carlos. 2006. Noria. *Noria*. [En línea] 5-9 de Junio de 2006. [Citado el: 10 de Febrero de 2009.] <http://www.noria.com/sp/rwla/conferencias/mem/Duarte-paper.pdf>.

Jaramillo@, Carlos Mario Pérez.

<http://www.escuelagobierno.org/inputs/los%20indicadores%20de%20gestion.pdf>.
<http://www.escuelagobierno.org/inputs/los%20indicadores%20de%20gestion.pdf>.
[En línea] [Citado el: 17 de Abril de 2009.]
<http://www.escuelagobierno.org/inputs/los%20indicadores%20de%20gestion.pdf>.

Leemis, Lawrence M. 1995. *Reliability: Probabilistic Models and Statistical Methods*. New jersey : Prentice Hall, 1995. ISBN 0-13-720517-1.

Lejarza@, J. 1999.

<http://www.uv.es/ceaces/base/modelos%20de%20probabilidad/simple.htm>.

<http://www.uv.es/ceaces/base/modelos%20de%20probabilidad/simple.htm>. [En línea] 1999. [Citado el: 18 de Junio de 2009.]

<http://www.uv.es/ceaces/base/modelos%20de%20probabilidad/exponencial.htm>.

lognormal@. 2009. WIKIPEDIA La enciclopedia libre. *WIKIPEDIA La enciclopedia libre*. [En línea] 15 de Abril de 2009. [Citado el: 17 de Junio de 2009.] http://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n_log-normal.

Ludwig Swärd, Knut Fredrik. 1961. *Machine Tool Maintenance*. Mekanförbund : Editorial Blume, 1961. 35557-1970.

MANTENIMIENTO@. 2006. Solomantenimiento. *Solomantenimiento*. [En línea] 04 de 01 de 2006. [Citado el: 06 de 03 de 2009.] http://www.solomantenimiento.com/m_correctivo.htm.

Martinez@, Matias. 2004. Monografias.com. *Monografias.com*. [En línea] 10 de Noviembre de 2004. [Citado el: 26 de Junio de 2009.] <http://www.monografias.com/trabajos18/teoria-colas/teoria-colas.shtml>.

McDaniel, Carl y Gates, Jr Rogers. 1999. *Investigación de mercados contemporanes*. s.l. : THOMSON, 1999. págs. 439-440. ISBN: 968-7529-57-1.

Mendiburu Diaz@, Henry. 1997. Monografias.com. *Monografias.com*. [En línea] 1997. [Citado el: 25 de Marzo de 2009.] <http://www.monografias.com/trabajos13/opema/opema.shtml>.

Molina@, Jose. 1997. Monografias. *Monografias*. [En línea] 1997. [Citado el: 6 de 03 de 2009.] <http://www.monografias.com/trabajos15/mantenimiento-industrial/mantenimiento-industrial.shtml>.

Mora G., Alberto. 2007. *Curso MIL, Mantenimiento Integral logístico*. Medellín : s.n., 2007.

Mora Gutierrez, Alberto. 2008. *Mantenimiento estrategico para empresas industriales o de servicios: Enfoque sistémico Kantiano*. Medellín : AMG, 2008. ISBN 958-33-8218-3.

Moreno G.@, Carlos J. 2008.

<http://automatizacionymantenimiento.blogspot.com/>.

<http://automatizacionymantenimiento.blogspot.com/>. [En línea] 2008. [Citado el: 16 de Julio de 2009.]

http://automatizacionymantenimiento.blogspot.com/2009/06/indicadores-de-gestion-de-mantenimiento_02.html.

NIST/SEMATECH@. 1999. <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>.

<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>. [En línea] SEPTIEMBRE de 1999. [Citado el: 19 de Junio de 2009.] <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>.

Parra, Carlos. 2009. Revision del impacto de los costes de fiabilidad dentro de las tecnicas modernas de analisis de coste de ciclo de vida (ACCV). Venezuela : s.n., 2009.

Pauro@, Ricardo.

<http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/IndicadMant.pdf>.

<http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/IndicadMant.pdf>.

[En línea] [Citado el: 17 de Abril de 2009.]

<http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/IndicadMant.pdf>.

Pelaez, Fernando. 1972. *Curso de Mantenimiento Programado*. Medellín : Tesis, 1972.

Rey Sacristán, Francisco. 2001. *Manual del Mantenimiento Integral en la empresa*. Madrid : Fundación Confemetal, 2001. ISBN 84-95428-18-0.

Ribera, Jaume. 2009. El rincon del vago. *El rincon del vago*. [En línea] 2009. [Citado el: 26 de Junio de 2009.] http://html.rincondelvago.com/teoria-de-colas_2.html.

Robles Diaz@, Juan Carlos. 2009. <http://www.icamalaga.es>. <http://www.icamalaga.es>. [En línea] 2009. [Citado el: 23 de Julio de 2009.] <http://www.icamalaga.es/portalMalaga/archivos/ficheros/1239101135762.pdf>.

Sacristan, Francisco Rey. 2001. *Mantenimiento total de la produccion: TPM proceso de implantacion y desarrollo*. Madrid : Fundacion Confemetal Editorial, 2001. ISBN: 84-95428-49-0.

Sandoval Hernandez@, Andres. 2004. Geocities. *Geocities*. [En línea] 12 de Abril de 2004. [Citado el: 30 de Junio de 2009.] http://uk.geocities.com/andres_sandoval_hernandez/Estadistica/Tema_4/Tema_4.doc.

Sierra, Jorge. 2005. *Simulacion de sistemas para Administracion e Ingenieria*. Mexico : CECSA, 2005. ISBN: 970-24-0843-1.

Tamborero@, José María y Antonio, Cejalvo. 2006.

www.jmcprl.net/NTPs/@Datos/ntp_418.htm.

www.jmcprl.net/NTPs/@Datos/ntp_418.htm. [En línea] 10 de Junio de 2006.

[Citado el: 17 de Junio de 2009.] www.jmcprl.net/NTPs/@Datos/ntp_418.htm.

Tavares, Lourival Augusto, y otros. 2007. *Gestion Estrategica en Activos de Mantenimiento.* [ed.] Marco Alcantara. Venezuela : GERENPLANIF C.A., 2007.

Torres, Leandro Daniel. 2005. *Mantenimiento. Su implementacion y gestion.* s.l. : Universitas, 2005.

Vallejo Jaramillo, Juan Santiago. 2004. *DESARROLLO, VALIDACIÓN, CONTRASTE Y PRONÓSTICO DEL CÁLCULO CMD.* Medellín : s.n., 2004.

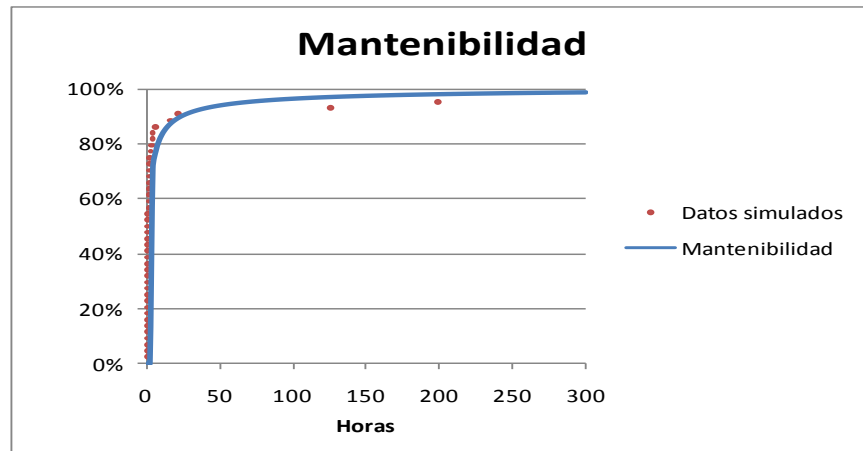
WIKIPEDIA@. WIKIPEDIA La enciclopedia libre. *WIKIPEDIA La enciclopedia libre.*

[En línea] [Citado el: 22 de Junio de 2009.]

[http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Normal distribution pdf.png](http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Normal_distribution_pdf.png).

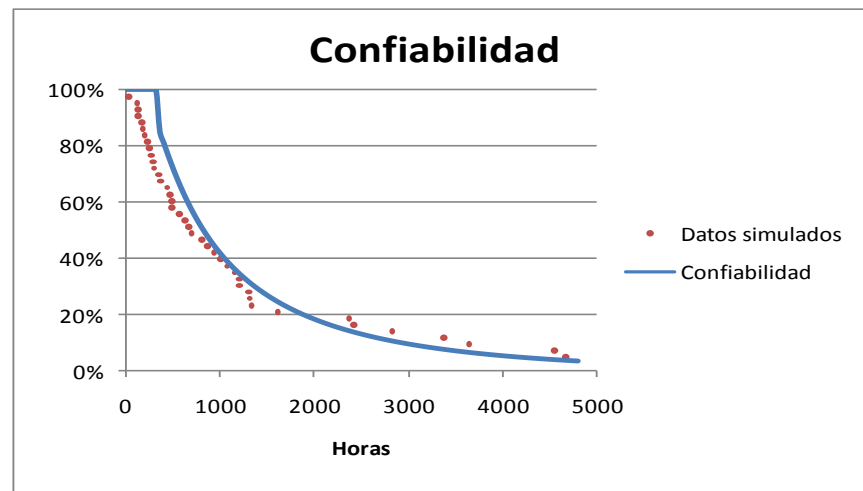
LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Mantenibilidad del equipo 1



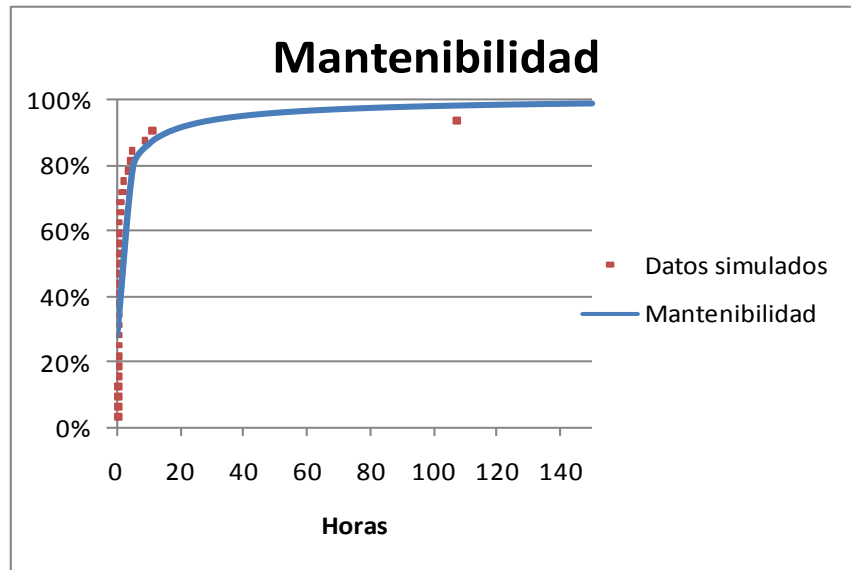
Fuente: autoría propia

Anexo 2. Confiabilidad del equipo 1



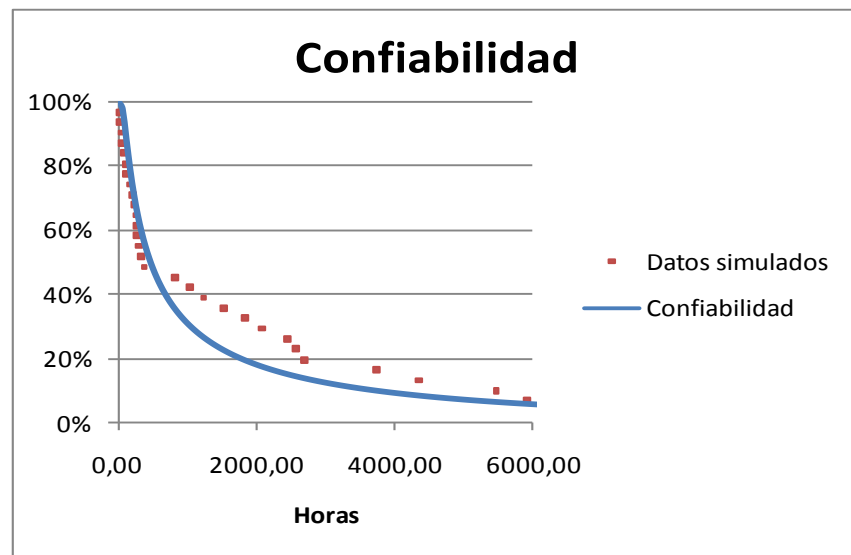
Fuente: autoría propia

Anexo 3. Mantenibilidad del equipo 2



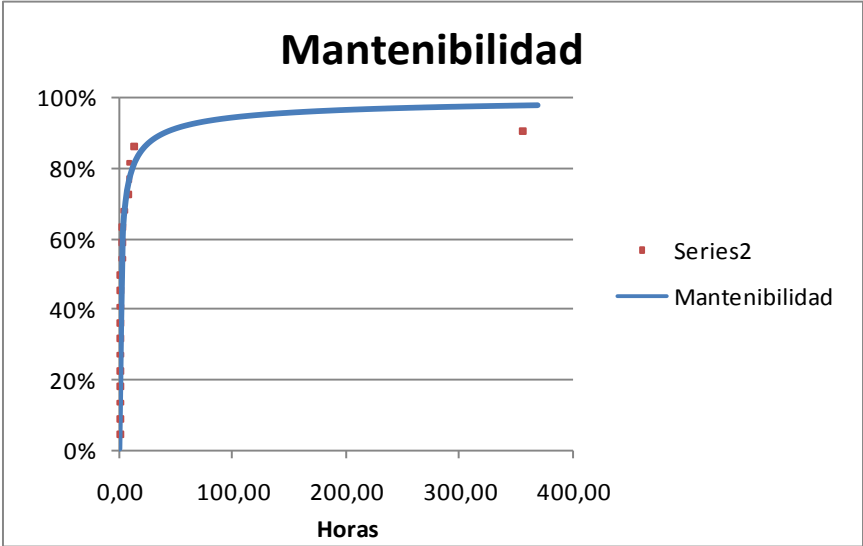
Fuente: autoría propia

Anexo 4. Confiabilidad del equipo 2



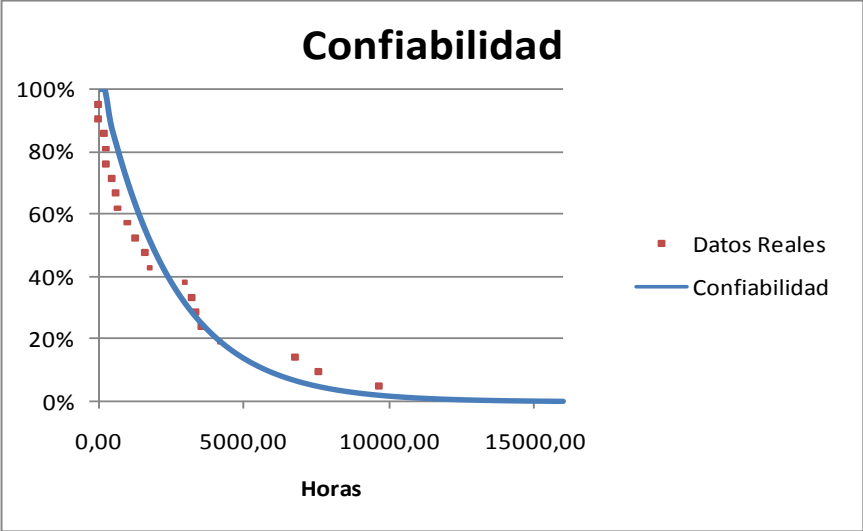
Fuente: autoría propia

Anexo 5. Mantenibilidad del equipo 3



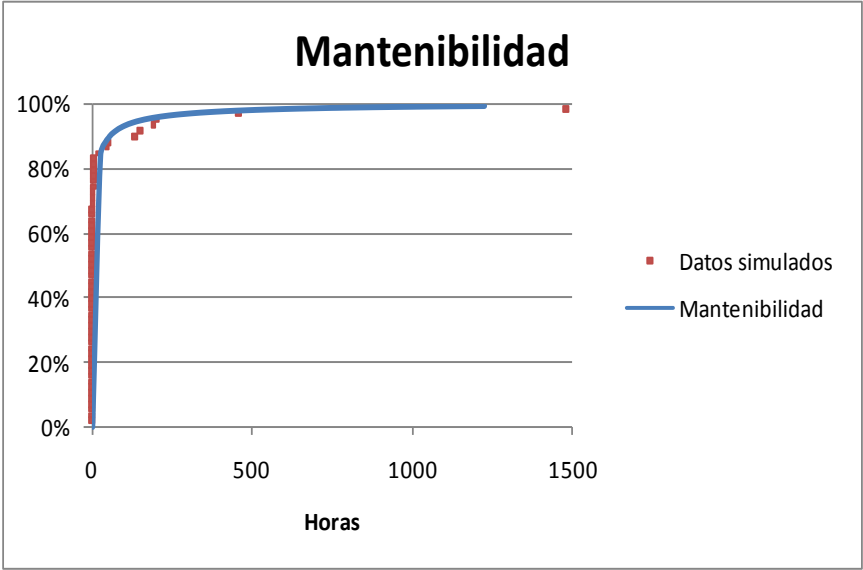
Fuente: autoría propia

Anexo 6. Confiabilidad del equipo 3



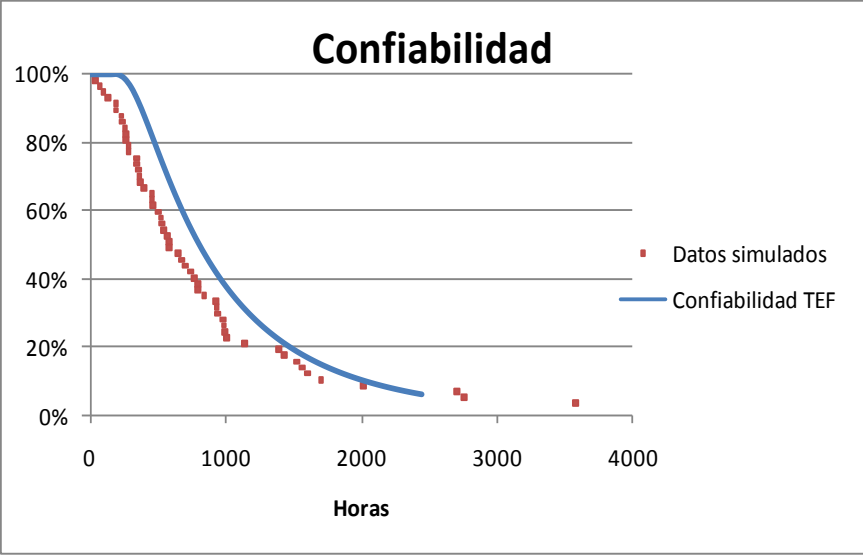
Fuente: autoría propia

Anexo 7. Mantenibilidad del equipo 4



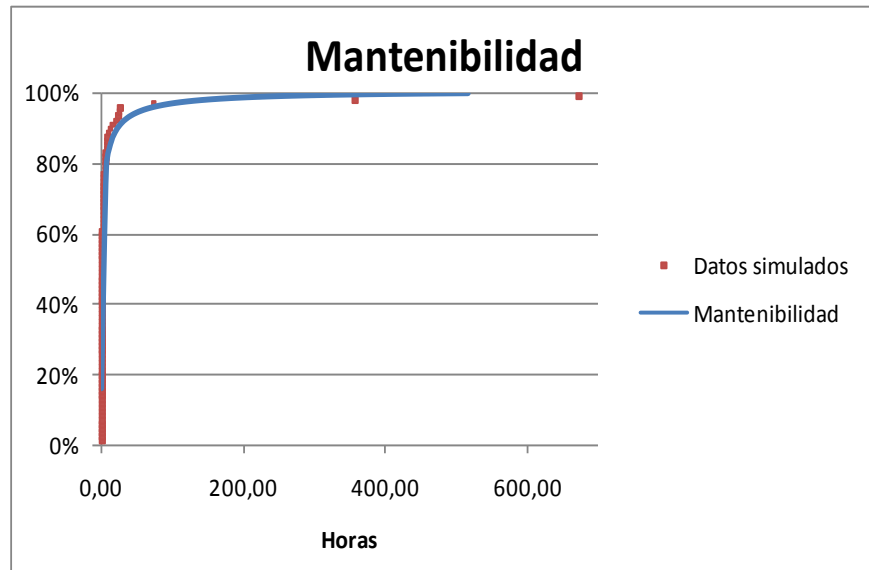
Fuente: autoría propia

Anexo 8. Confiabilidad del equipo 4



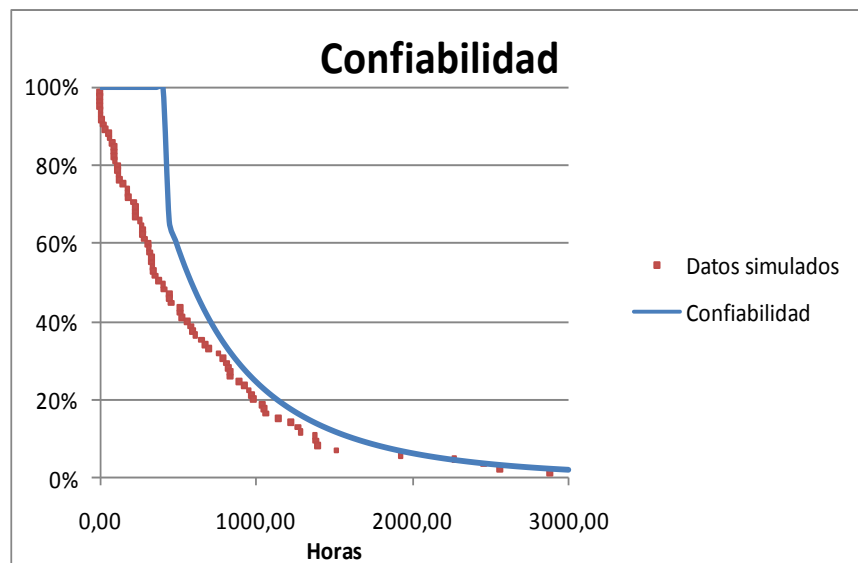
Fuente: autoría propia

Anexo 9. Mantenibilidad del equipo 5



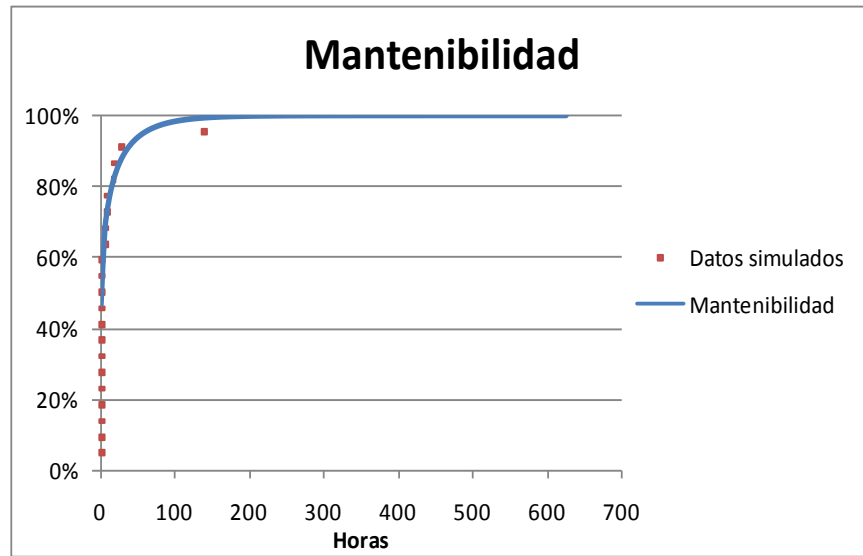
Fuente: autoría propia

Anexo 10. Confiabilidad del equipo 5



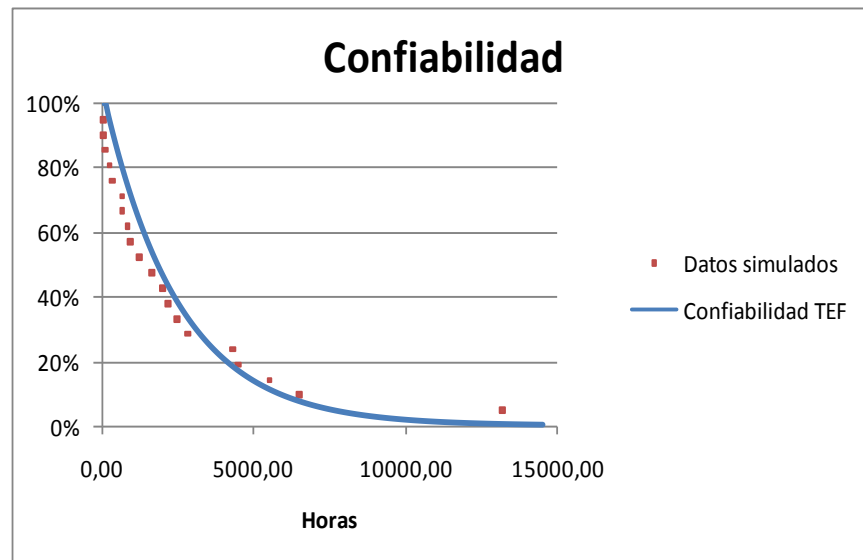
Fuente: autoría propia

Anexo 11. Mantenibilidad del equipo 6



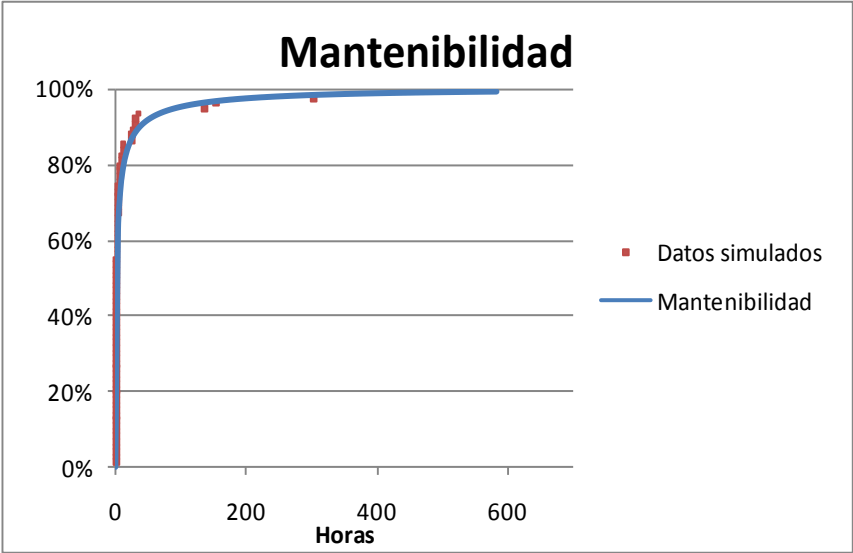
Fuente: autoría propia

Anexo 12. Confiabilidad del equipo 6



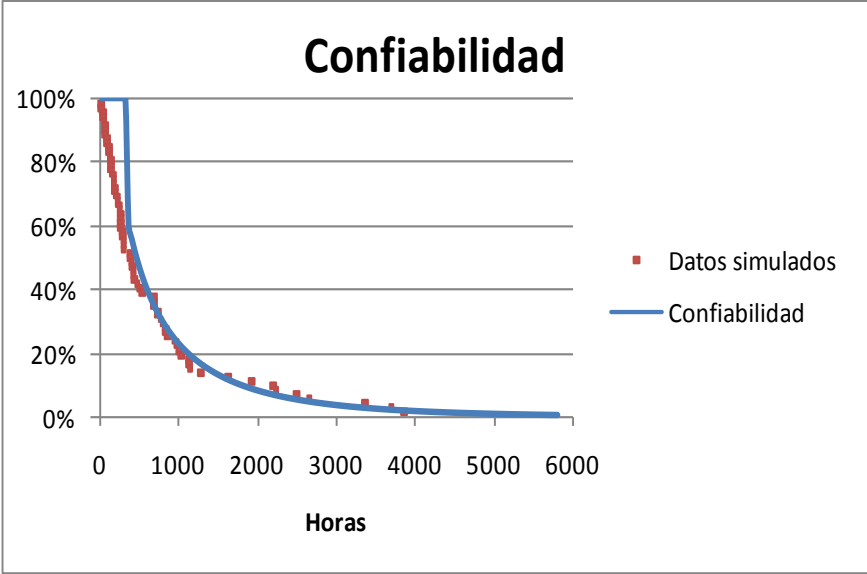
Fuente: autoría propia

Anexo 13. Mantenibilidad del equipo 7



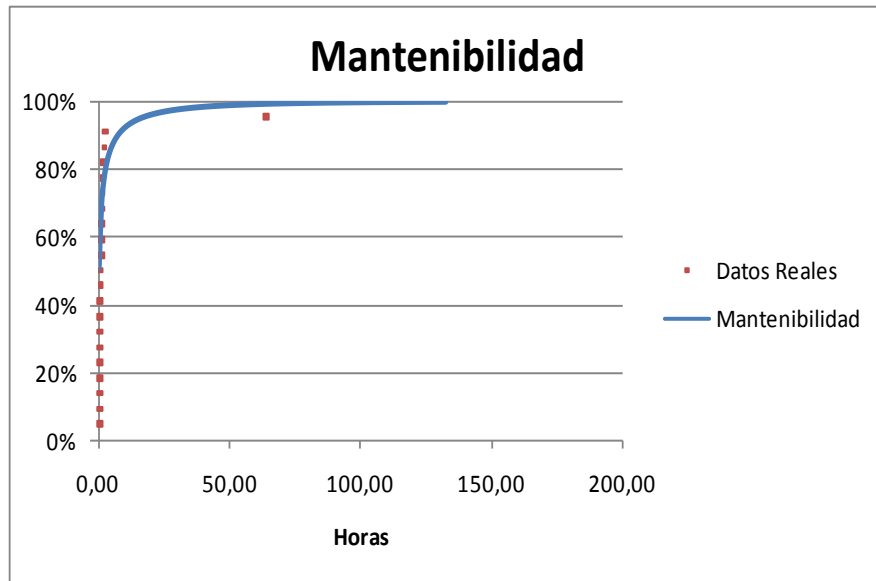
Fuente: autoría propia

Anexo 14. Confiabilidad del equipo 7



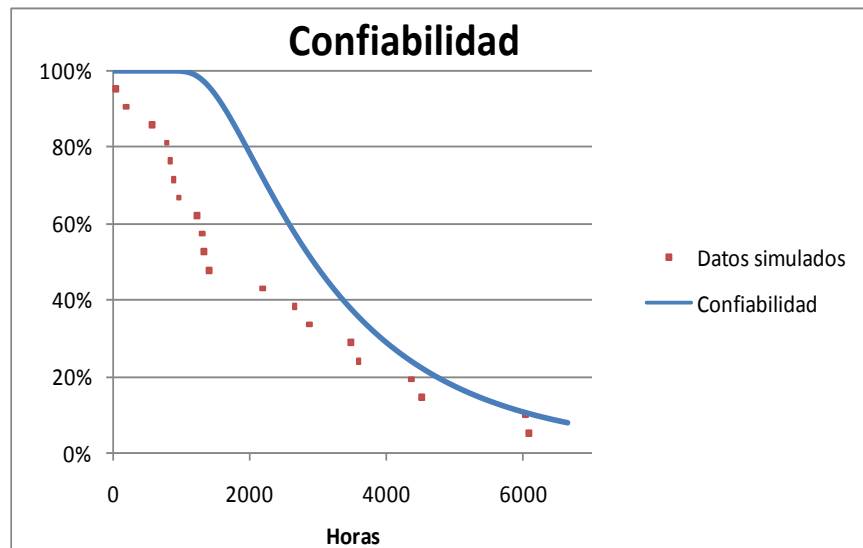
Fuente: autoría propia

Anexo 15. Mantenibilidad del equipo 8



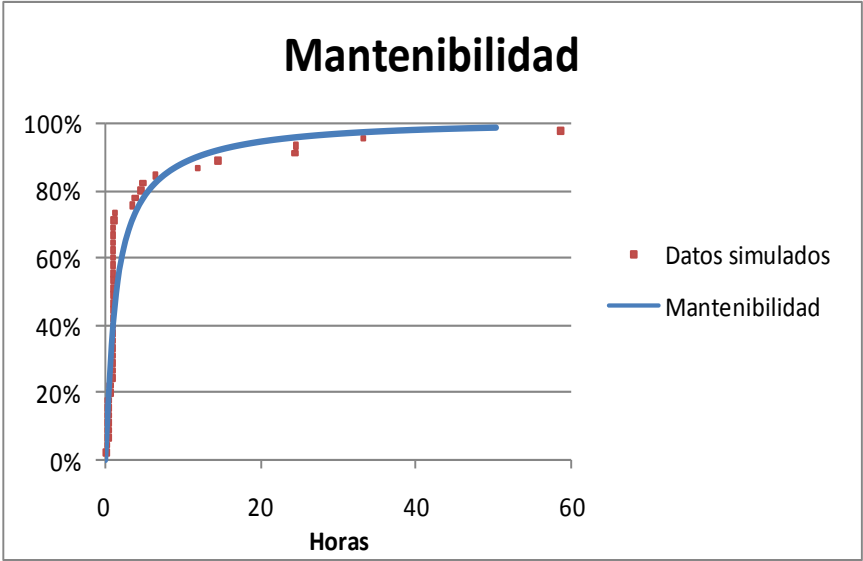
Fuente: autoría propia

Anexo 16. Confiabilidad del equipo 8



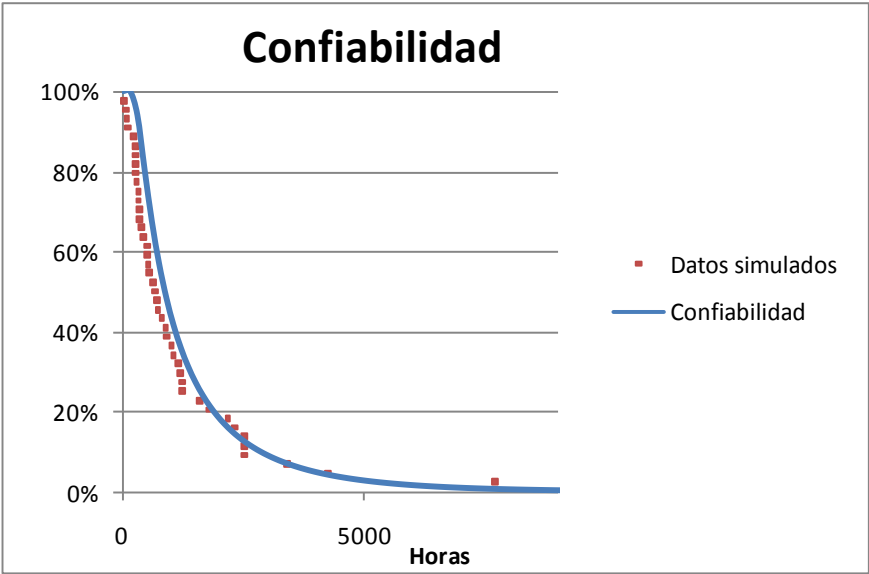
Fuente: autoría propia

Anexo 17. Mantenibilidad del equipo 9



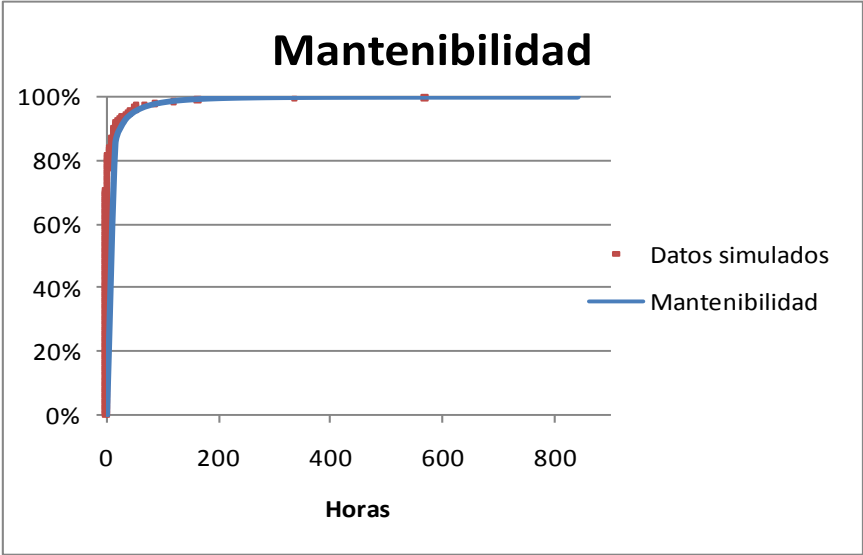
Fuente: autoría propia

Anexo 18. Confiabilidad del equipo 9



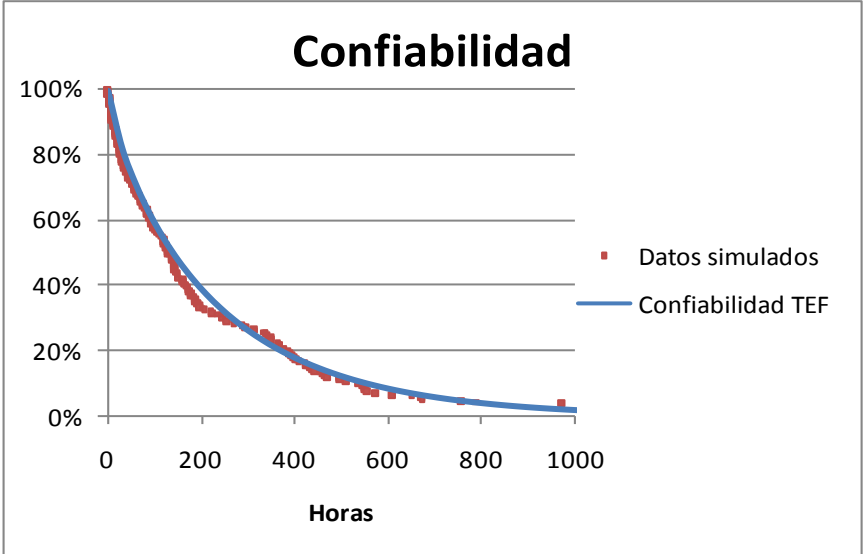
Fuente: autoría propia

Anexo 19. Mantenibilidad del equipo 10



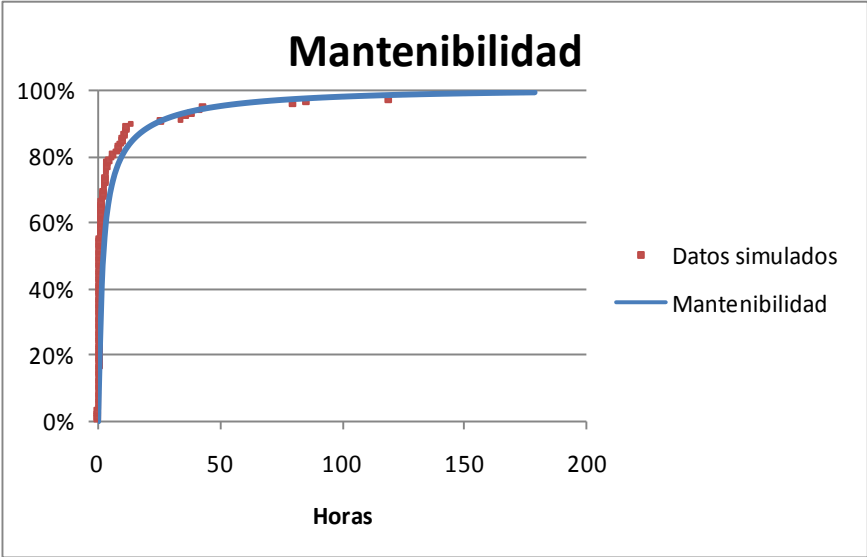
Fuente: autoría propia

Anexo 20. Confiabilidad del equipo 10



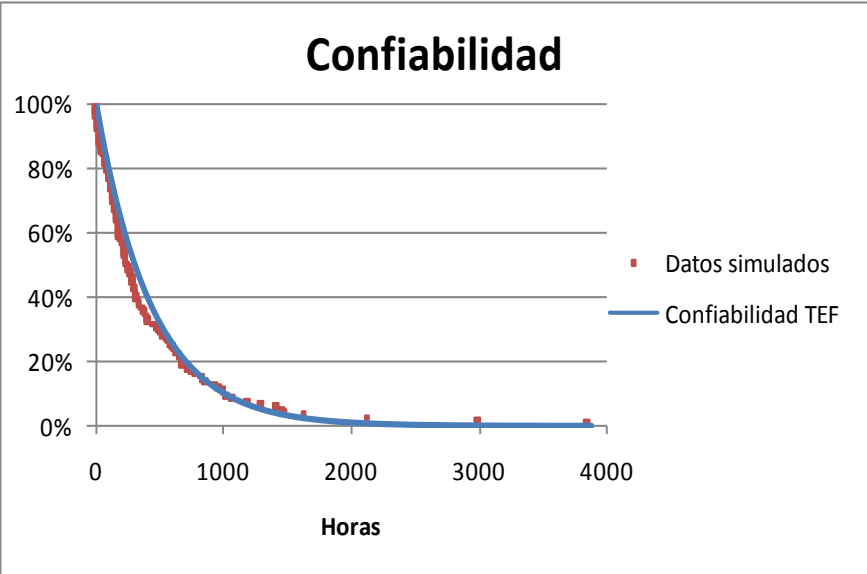
Fuente: autoría propia

Anexo 21. Mantenibilidad del equipo 11



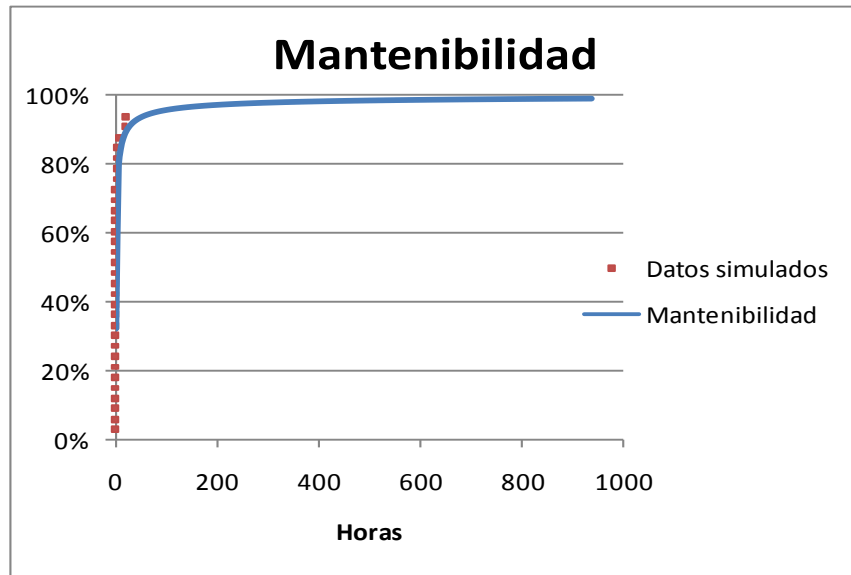
Fuente: autoría propia

Anexo 22. Confiabilidad del equipo 11



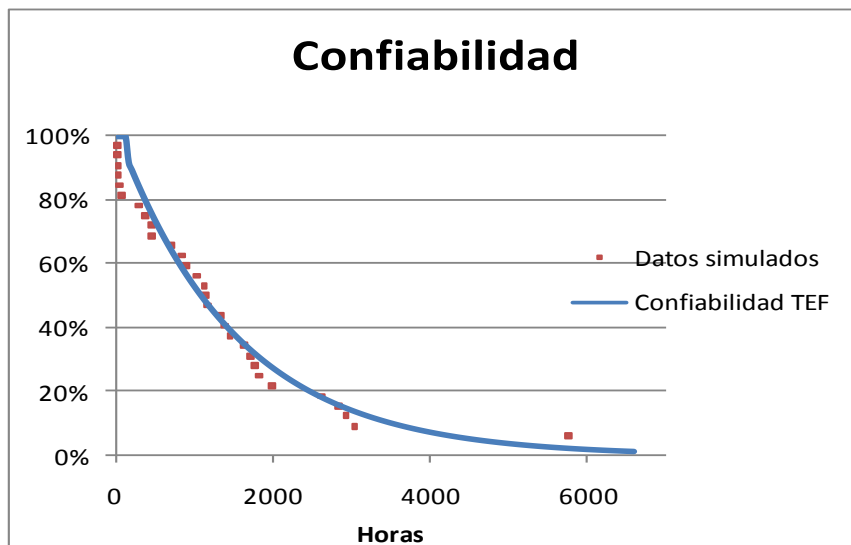
Fuente: autoría propia

Anexo 23. Mantenibilidad del equipo 12



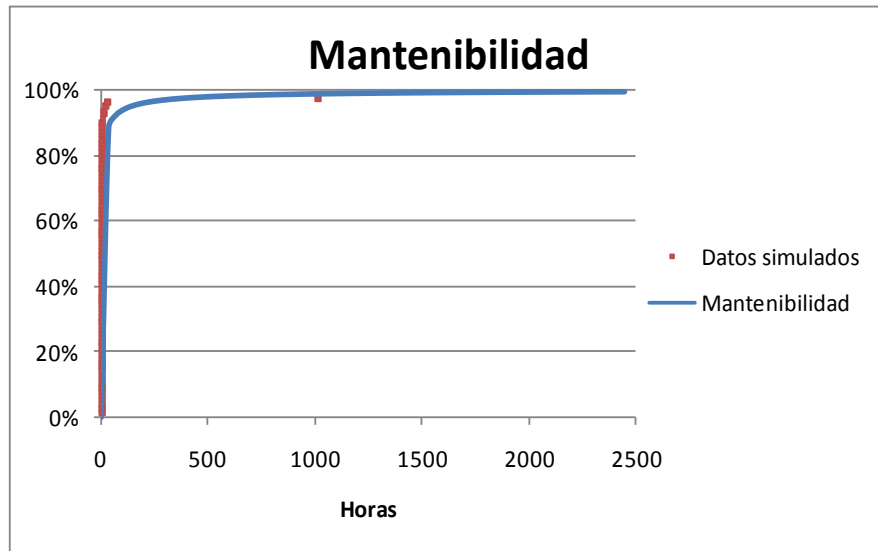
Fuente: autoría propia

Anexo 24. Confiabilidad del equipo 12



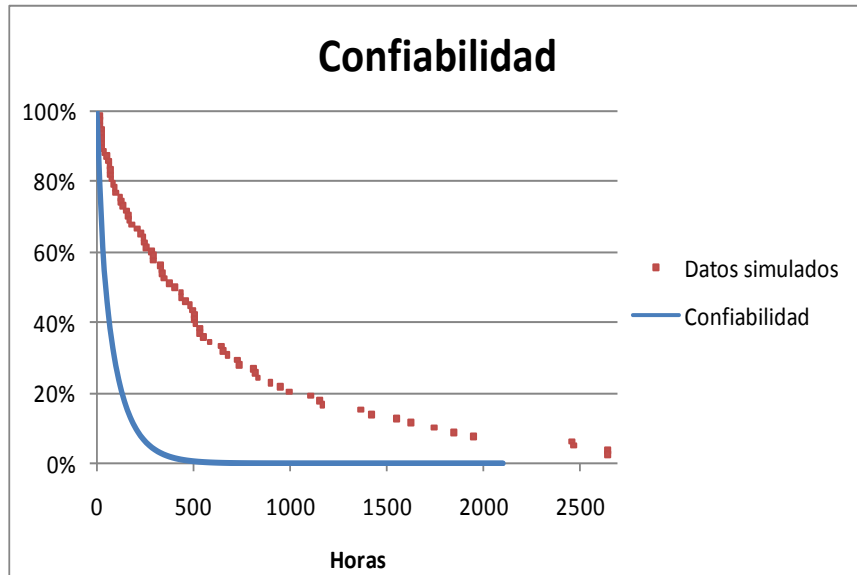
Fuente: autoría propia

Anexo 25. Mantenibilidad del equipo 13



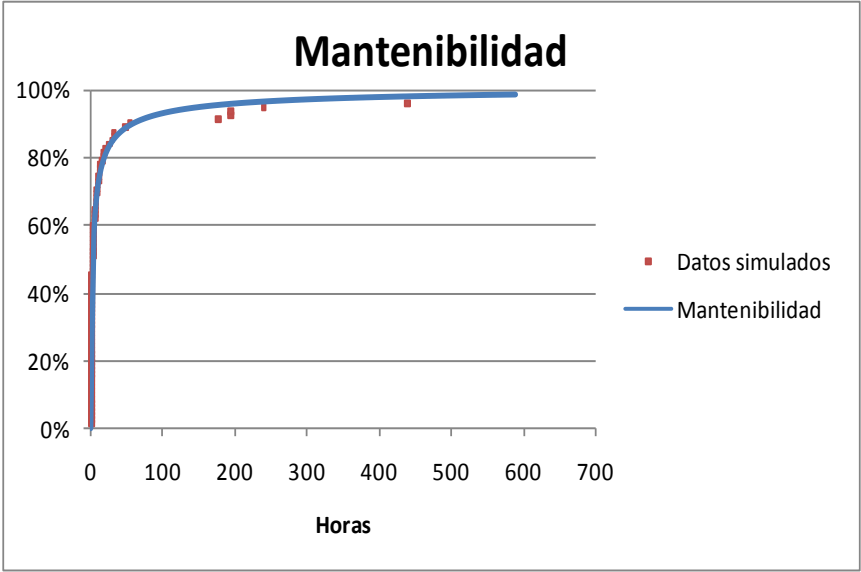
Fuente: autoría propia

Anexo 26. Confiabilidad del equipo 13



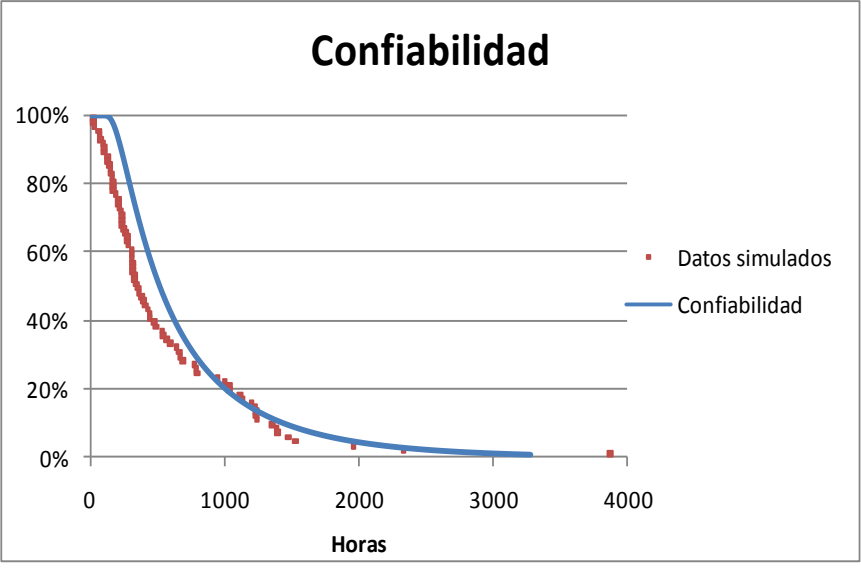
Fuente: autoría propia

Anexo 27. Mantenibilidad del equipo 14



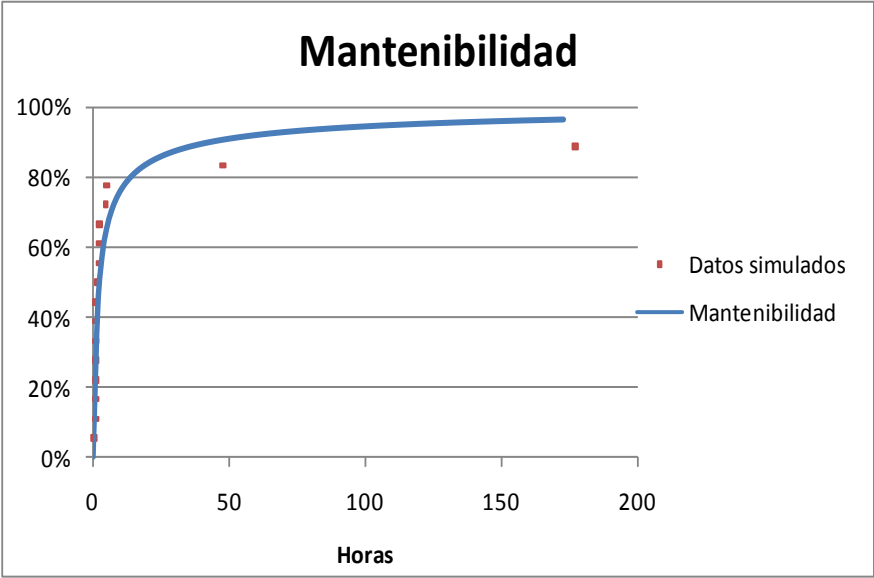
Fuente: autoría propia

Anexo 28. Confiabilidad del equipo 14



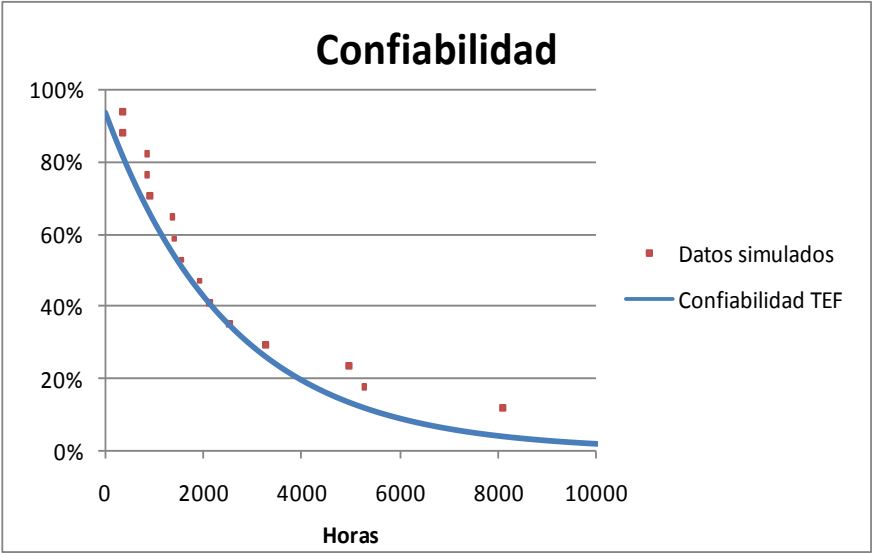
Fuente: autoría propia

Anexo 29. Mantenibilidad del equipo 15



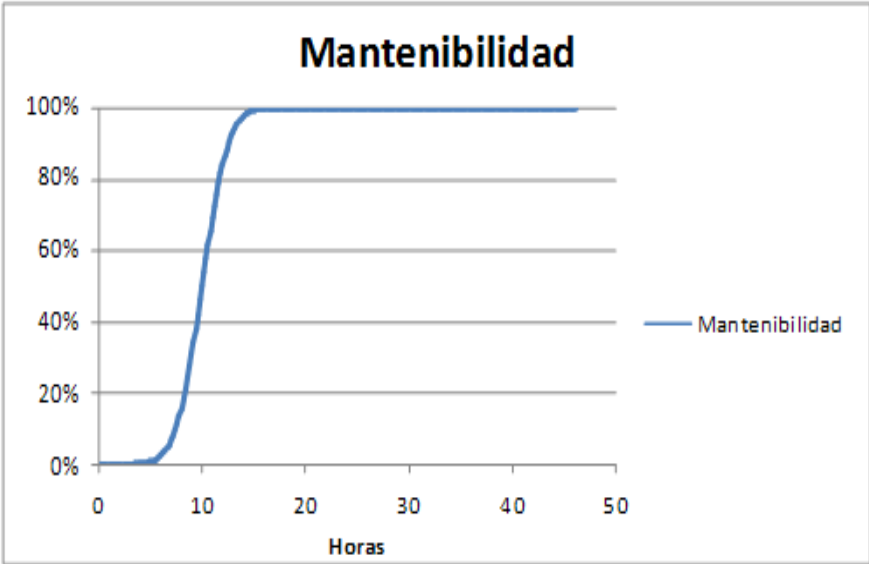
Fuente: autoría propia

Anexo 30. Confiabilidad del equipo 15



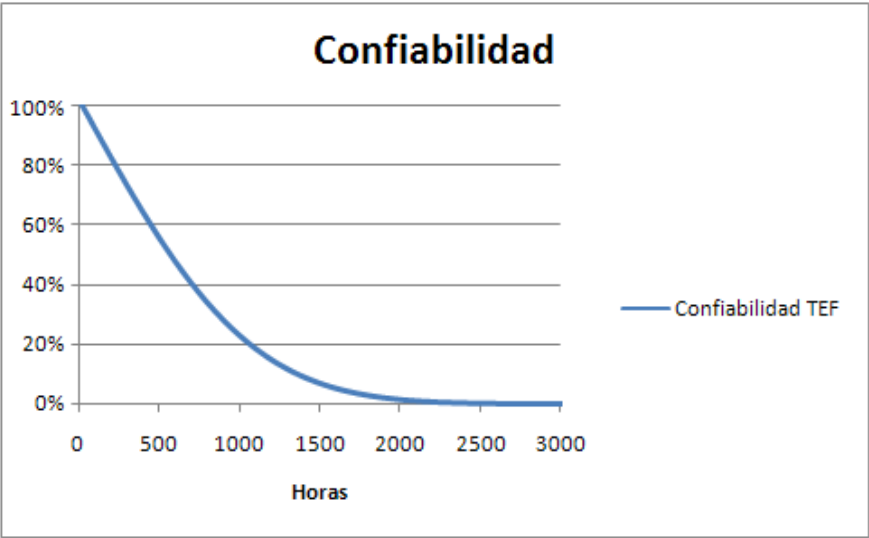
Fuente: autoría propia

Anexo 31. Mantenibilidad del equipo 16



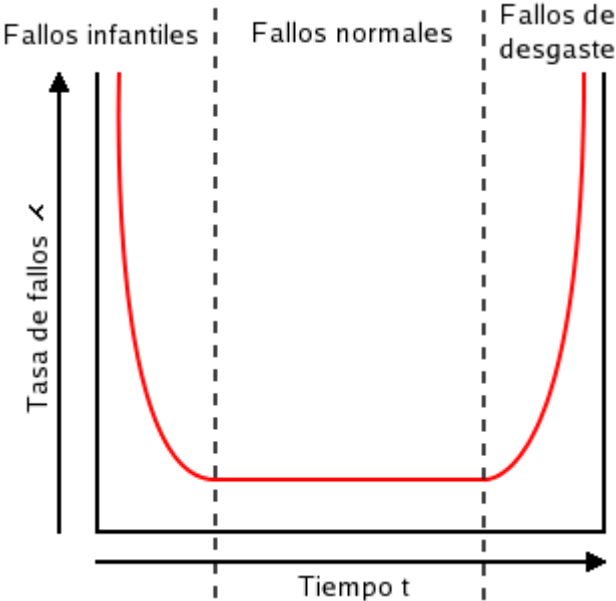
Fuente: autoría propia

Anexo 32. Confiabilidad del equipo 16



Fuente: autoría propia

Anexo 33. Curva de Davies



Fuente: MANTENIMIENTO@, 2006