

*Encabezado: Confiabilidad aplicada a sistemas productivos*

***APROXIMACIÓN DE LA CONFIABILIDAD PARA OPTIMIZAR PROCESOS DE  
MANTENIMIENTO Y PRODUCTIVOS CON DISTRIBUCIÓN WEIBULL***

POR  
SERGIO ANDRÉS PULGARÍN SÁNCHEZ  
Cod. Estudiantil 201810012114  
C.C 1152204573



UNIVERSIDAD EAFIT  
MAGISTER EN INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
MEDELLÍN - ANTIOQUIA - COLOMBIA  
2019



***APROXIMACIÓN DE LA CONFIABILIDAD PARA OPTIMIZAR PROCESOS DE  
MANTENIMIENTO Y PRODUCTIVOS CON DISTRIBUCIÓN WEIBULL***

POR  
SERGIO ANDRÉS PULGARÍN SÁNCHEZ  
CÓDIGO ESTUDIANTE 201810012114  
CÉDULA 1152204573

DIRECTOR  
PH.D. LUIS ALBERTO MORA GUTIÉRREZ

REQUISITO PARA OPTAR AL ÍTULO  
DE MAGISTER EN INGENEIRÍA  
TESIS DE GRADO  
UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
MEDELLÍN - ANTIOQUIA - COLOMBIA  
2019

**Contenido**

	Pág.
<b>Contenido</b> .....	iv
<b>Figuras</b> .....	vii
<b>Tablas</b> .....	viii
<b>Sección 0 - Prólogo</b> .....	<b>9</b>
Aparte 1 - Sección 0 - Introducción .....	10
<b>Artículo 1 del Aparte 1 Sección 0 - Objetivos</b> .....	<b>11</b>
<i>Elemento 1 del Artículo 1 del Aparte 1 Sección 0 - General</i> .....	<i>12</i>
<i>Elemento 2 del Artículo 1 del Aparte 1 Sección 1 - Específicos</i> .....	<i>12</i>
<i>Elemento 3 del Artículo 1 del Aparte 1 Sección 0 - UNO - Confiabilidad</i> .....	<i>12</i>
<i>Elemento 4 del Artículo 1 del Aparte 1 Sección 0 - DOS - Procesos</i> .....	<i>12</i>
<i>Elemento 5 del Artículo 1 del Aparte 1 Sección 0 - TRES - Técnica de confiabilidad de procesos</i> .....	<i>13</i>
<i>Elemento 6 del Artículo 1 del Aparte 1 Sección 0 - CUATRO - Resultados</i> ....	<i>13</i>
<i>Elemento 7 del Artículo 1 del Aparte 1 Sección 0 - CINCO - Conclusiones</i> ...	<i>13</i>
Aparte 2 - Sección 0 - Estructura del proyecto .....	15
Aparte 3 - Sección 0 - Justificación .....	15
Aparte 4 - Sección 0 - Antecedentes .....	16
Aparte 5 - Sección 0 - Conclusiones del Capítulo 0 .....	18
<b>Sección 1 - Confiabilidad</b> .....	<b>19</b>
Aparte 1 - Sección 1 - Objetivo número 1 .....	19
Aparte 2 - Sección 1 - Introducción capítulo 1 .....	19
Aparte 3 - Sección 1 - Desarrollo de capítulo 1 .....	19
<b>Artículo 1 del Aparte 3 Sección 1 - Confiabilidad</b> .....	<b>20</b>
<b>Artículo 2 del Aparte 3 Sección 1 - Ingeniería de fábricas</b> .....	<b>21</b>
<b>Artículo 3 del Aparte 3 Sección 1 - Relaciones</b> .....	<b>23</b>
<b>Artículo 4 del Aparte 3 Sección 1 - Confiabilidad y fallas</b> .....	<b>24</b>
<b>Artículo 5 del Aparte 3 Sección 1 - Estructura de la confiabilidad</b> .....	<b>26</b>
<i>Elemento 1 del Artículo 5 del Aparte 3 Sección 1 - Probabilidad</i> .....	<i>27</i>
<i>Elemento 2 del Artículo 5 del Aparte 3 Sección 1 - Desempeño satisfactorio</i> .	<i>27</i>
<i>Elemento 3 del Artículo 5 del Aparte 3 Sección 1 - Período</i> .....	<i>28</i>
<i>Elemento 3 del Artículo 5 del Aparte 3 Sección 1 - Condiciones de operación</i>	<i>28</i>
<b>Artículo 6 del Aparte 3 Sección 1 - Confiabilidad en los procesos</b> .....	<b>29</b>
<i>Elemento 1 del Artículo 6 del Aparte 3 Sección 1 - Disponibilidad</i> .....	<i>29</i>
<i>Elemento 2 del Artículo 6 del Aparte 3 Sección 1 - Cálculos confiabilidad</i> ....	<i>31</i>
Parágrafo 1 del Elemento 2 del Artículo 6 del Aparte 3 Sección 1 –	
Método i-kaésimo o estimador no sesgado.....	31

Parágrafo 2 del Elemento 2 del Artículo 6 del Aparte 3 Sección 1 – Método de Rango de Medianas .....	32
Parágrafo 3 del Elemento 2 del Artículo 6 del Aparte 3 Sección 1 – Método Benard o de aproximación de Rango de Medianas .....	37
Parágrafo 4 del Elemento 2 del Artículo 6 del Aparte 3 Sección 1 – Método Kaplan & Meyer.....	37
Parágrafo 6 del Elemento 2 del Artículo 6 del Aparte 3 Sección 1 – Desarrollo técnico de cálculos Confiabilidad.....	38
Parágrafo 7 del Elemento 2 del Artículo 6 del Aparte 3 Sección 1 – Alineación - Cálculos Confiabilidad .....	39
<b><i>Elemento 3 del Artículo 6 del Aparte 3 Sección 1 - Mantenibilidad .....</i></b>	<b>43</b>
<b><i>Elemento 3 del Artículo 6 del Aparte 3 Sección 1 - Capacidad.....</i></b>	<b>44</b>
Aparte 4 - Sección 1 - Conclusiones del Capítulo 1 .....	44
<b>Sección 2 - Procesos .....</b>	<b>46</b>
Aparte 1 - Sección 2 - Objetivo número 2 .....	46
Aparte 2 - Sección 2 - Introducción capítulo 2 .....	46
Aparte 3 - Sección 2 - Desarrollo de capítulo 2 .....	47
<b>Artículo 1 del Aparte 3 Sección 2 - Ventajas de usar MRs.....</b>	<b>47</b>
<b>Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 - Quantum Performance.....</b>	<b>48</b>
<b><i>Elemento 1 del Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 – Categorías de rendimiento</i></b> .....	<b>49</b>
Parágrafo 1 del Elemento 1 del Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 - Calidad.....	49
Parágrafo 2 del Elemento 1 del Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 - Tiempo.....	50
Parágrafo 3 del Elemento 1 del Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 - Costo .....	50
<b><i>Elemento 3 del Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 - Elementos de medición del Quantum Performance.....</i></b>	<b>51</b>
Parágrafo 1 del Elemento 3 del Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 - Elementos conductores.....	52
Parágrafo 2 del Elemento 3 del Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 - Facilitadores.....	53
Parágrafo 3 del Elemento 3 del Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 - Proceso en sí.....	55
Parágrafo 4 de Elemento 3 del Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 - Mejora continua .....	60
<b><i>Elemento 4 del Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 - Matriz resumen del Quantum Performance.....</i></b>	<b>61</b>
<b><i>Elemento 5 del Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 – Efectividad del proceso... </i></b>	<b>63</b>
Aparte 4 - Sección 2 - Conclusiones capítulo 2 .....	65
<b>Sección 3 - Metodología confiabilidad.....</b>	<b>66</b>
Aparte 1 - Sección 3 - Objetivo número 3 .....	66
Aparte 2 - Sección 3 - Introducción capítulo 3 .....	66

Aparte 3 - Sección 3 - Desarrollo de capítulo 3 .....	67
<b>Artículo 1 del Aparte 3 Sección 3 - Introducción a Weibull.....</b>	<b>67</b>
<b>Artículo 2 del Aparte 3 Sección 3 - Ventajas de usar Weibull en procesos productivos.....</b>	<b>68</b>
<b>Artículo 3 del Aparte 3 Sección 3 - Gráfica de Weibull aplicada al proceso productivo .....</b>	<b>69</b>
<i>Elemento 1 del Artículo 3 del Aparte 3 Sección 3 – Fundamentos de la distribución Weibull .....</i>	<i>71</i>
<i>Elemento 2 del Artículo 3 del Aparte 3 Sección 3 – Identificación de procesos según la gráfica Weibull .....</i>	<i>73</i>
<i>Elemento 3 del Artículo 3 del Aparte 3 Sección 3 – Capacidad, productividad y pérdidas leídas desde el gráfico Weibull.....</i>	<i>76</i>
<b>Artículo 3 del Aparte 3 Sección 3 - Gráfica de Weibull en análisis de confiabilidad para mantenimiento.....</b>	<b>81</b>
Aparte 4 - Sección 3 - Conclusiones del Capítulo 3 .....	87
<b>Sección 4 - Táctica.....</b>	<b>89</b>
Aparte 1 - Sección 4 - Objetivo 4.....	89
Aparte 2 - Sección 4 - Introducción capítulo 4 .....	89
Aparte 3 - Sección 4 - Desarrollo.....	89
<b>Artículo 1 del Aparte 4 - Sección 4 - Resultados del ejemplo de Barringer.....</b>	<b>90</b>
<i>Elemento 1 del Artículo 1 del Aparte 4 Sección 4 – Respuesta a las preguntas planteadas .....</i>	<i>90</i>
<i>Elemento 2 del Artículo 1 del Aparte 4 Sección 4 – Pérdidas de confiabilidad.....</i>	<i>92</i>
<i>Elemento 3 del Artículo 1 del Aparte 4 Sección 4 – Pérdidas de eficiencia y utilización.....</i>	<i>92</i>
<b>Artículo 2 del Aparte 4 - Sección 4 - Resultados de análisis del autor .....</b>	<b>93</b>
Aparte 4 - Sección 4 - Conclusiones capítulo 4 .....	102
<b>Sección 5 – Conclusiones .....</b>	<b>104</b>
Aparte 1 - Sección 5 - Objetivo.....	104
Aparte 2 - Sección 5 - Introducción .....	104
Aparte 3 - Sección 5 - Desarrollo.....	104
<b>Artículo 1 del Aparte 5 - Sección 5 - Primera conclusión .....</b>	<b>105</b>
<b>Artículo 2 del Aparte 5 - Sección 5 - Segunda conclusión.....</b>	<b>105</b>
<b>Artículo 3 del Aparte 5 - Sección 5 – Tercera conclusión .....</b>	<b>106</b>
<b>Artículo 4 del Aparte 5 - Sección 5 – Cuarta conclusión .....</b>	<b>107</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>109</b>

## Figuras

Figura 1- Secuencia lógica de objetivos.....	11
Figura 2 - Profundidad de los verbos de Bloom & Gagné .....	14
Figura 3 - Verbos para configurar objetivos .....	14
Figura 4 - Elementos de un sistema Kantiano .....	21
Figura 5 - Ingeniería de fábricas.....	22
Figura 6 - Elementos estructurales de Ingeniería de Fábricas .....	24
Figura 7 - Estado de funcionalidad.....	25
Figura 8 - Tipos de disponibilidades .....	30
Figura 9 - Tablas de Rango de Mediana.....	35
Figura 10 - Tablas de $F(t)$ o $M(t)$ con datos pares e impares respectivamente.....	36
Figura 11 - Estado del cálculo Confiabilidad.....	39
Figura 12 - Organización piramidal del Quantum Performance .....	48
Figura 13 - Elementos del Quantum Performance .....	51
Figura 14 - Curva de motivación y desmotivación típica .....	54
Figura 15 - Etapas del proceso en sí.....	55
Figura 16 - Proceso de gestión .....	56
Figura 17- Un diagrama de flujo permite describir el proceso, mediante un flujo de acciones y decisiones.....	58
Figura 18- Gráfico interfuncional muestra las diferentes partes de funciones que intervienen en un proceso .....	59
Figura 19 - Orden de ideas para la aplicación de conceptos .....	61
Figura 20 - Matriz de medición del Q.P .....	62
Figura 21 - Papel de Weibull para producción.....	72
Figura 22- Weibull sin problemas de producción .....	74
Figura 23- Weibull con problemas de producción .....	75
Figura 24- Capacidad y pérdidas de producción .....	77
Figura 25- Problema simple con problemas de confiabilidad.....	80
Figura 26- Ejemplo de tiempos de funcionamiento y no funcionamiento de una máquina ..	82
Figura 27- Obtención de parámetros para obtener MTBF por método gráfico.....	85
Figura 28- Obtención de parámetros para obtener MTTR por método gráfico .....	86

## Tablas

Tabla 1 - Niveles .....	13
Tabla 2 - Ventajas de usar Medidas de Rendimiento .....	48
Tabla 3- Tipos de control de proceso .....	75
Tabla 4- Cálculos para alineación de Weibull.....	83
Tabla 5- Resultados del Ejemplo de disponibilidad Inherente para alineación de Weibull..	84
Tabla 6- Resultados de la lectura con el papel de Weibull .....	87
Tabla 7. Resultados experimento Barringer .....	91
Tabla 8. Resultados experimento autor .....	94
Tabla 9. Resultados indicadores experimento 1 .....	97
Tabla 10. Resultados experimento autor 2 .....	98
Tabla 11. Resultados indicadores experimento autor 2.....	101

## Ecuaciones

Ecuación 1 - Función de disponibilidad.....	29
Ecuación 2 - Estimador i- kaésimo de No confiabilidad.....	31
Ecuación 3 - Método de Benard Aproximación de Rango de Medianas .....	37
Ecuación 4 - Método de estimación Kaplan-Meier para $A_1$ .....	38
Ecuación 5 - Método de estimación Kaplan-Meier Modificado para $A_1$ .....	38
Ecuación 6 - Transformación en Weibull para los valores Y y X.....	41
Ecuación 7 - Parámetros de Weibull .....	41
Ecuación 8 - Fórmula para hallar el tiempo medio entre fallas.....	42
Ecuación 9 - Función de Weibull aplicada a confiabilidad.....	42
Ecuación 10 - Distribución de Weibull aplicada a la no confiabilidad o mantenibilidad. ...	44
Ecuación 11 - Ecuación de efectividad .....	63
Ecuación 12 - Ecuación del ciclo de vida.....	64
Ecuación 13- Productividad .....	78

## Sección 0 - Prólogo

Numerosas tecnologías y diferentes organizaciones industriales han influenciado en las conductas gerenciales de mantenimiento. Los grandes desarrollos implementados en las industrias obligan a la gestión de mantenimiento a ser un área de permanente aprendizaje tanto en el campo tecnológico como en el científico. En el presente, la tecnología y las organizaciones son las que definen las pautas de los sistemas gerenciales de mantenimiento (HajShirmohammad & Wedley, 2004) (Thorsteinsson, Luxhoj, & Riis, 1997) (Wireman T. , 1994) (Wireman T. , 2004).

El papel de mantenimiento es el de incrementar la confiabilidad de los sistemas de producción al realizar actividades tales como planeación, organización, control y ejecución de métodos de conservación de los equipos. Sus funciones van más allá de las reparaciones; su valor se aprecia en la medida en que éstas disminuyan como resultado de un trabajo planificado y sistemático con apoyo y recursos de una política integral de los directivos (Mora, Mantenimiento industrial en empresas de tecnologías avanzadas, 1999).

Las mediciones son vitales en los procesos empresariales y definen qué es lo importante para toda la organización, establecen estrategias en los altos mandos, muestran resultados de los procesos en los niveles más bajos hacia las cúpulas superiores, estableciendo controles y mejoras logrables y logradas dentro de los procesos. Al tener una visión global de las medidas de rendimiento se puede lograr la implementación de la estrategia, el alcance de las metas y los objetivos; y la mejora continua y sostenible.

## **Aparte 1 - Sección 0 - Introducción**

La confiabilidad en los procesos productivos es una herramienta que puede ayudar a cualquier empresa a optimizar la disponibilidad y reducir la variabilidad en la producción de la planta, para ello, los conceptos de análisis por distribución Weibull<sup>1</sup> y eficiencia real de producción son aplicados para dar conocimiento de las condiciones de operación, buscando dar un aproximado de la confiabilidad y pérdidas por fallas en el proceso (Barringer & Woodrow, 2008).

La medición de confiabilidad y desempeño de las áreas internas que conforman un proceso productivo ayudan a conocer en tiempo real el estado, la evolución y las problemáticas asociadas, de tal forma que se pueda tener un pronóstico de las fallas futuras y se tomen acciones preventivas adecuadas (Montero & Díaz, 2013).

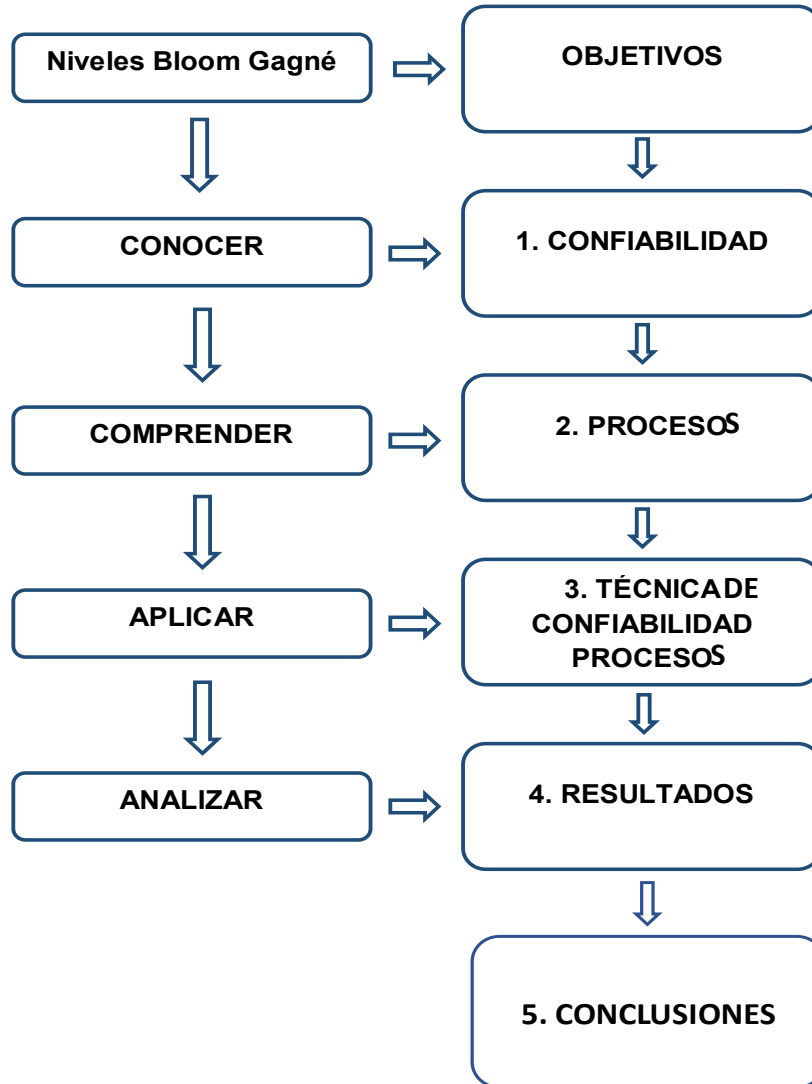
Los diagramas de Weibull ayudan a explicar y categorizar los problemas en un formato visual comprensible para ingenieros, propietarios de procesos y administración. Las pérdidas de producción en unidades de producción son un precursor del dinero. Cuando los problemas se explican en términos del tiempo y del dinero, todo el mundo las entiende. (Barringer@, 1997).

---

<sup>1</sup> Se origina de la distribución presentada por Wallodi Weibull, y es una técnica para estimar una probabilidad basada en datos medidos o supuestos.

**Artículo 1 del Aparte 1 Sección 0 - Objetivos**

La organización de los objetivos se realiza con base en la teoría de los niveles de Bloom Gagné, metodología planteada por el psicólogo y pedagogo estadounidense Robert Mills Gagné, quien enseña la existencia de los diferentes tipos de niveles de aprendizaje.



*Figura 1- Secuencia lógica de objetivos*

***Elemento 1 del Artículo 1 del Aparte 1 Sección 0 - General***

Para la realización de este proyecto se parte de dos temas centrales, el primero es el objetivo general donde se da cobertura a la generalidad macro del proyecto, el segundo son los objetivos específicos donde se abordan aquellos puntos que permitirán alcanzar el objetivo general.

Optimizar procesos productivos a partir de la medición y análisis de su confiabilidad, implementando distribuciones estadísticas con antecedentes exitosos en gestión de mantenimiento.

***Elemento 2 del Artículo 1 del Aparte 1 Sección 1 - Específicos***

La construcción de los objetivos se hace con base en la metodología de Bloom & Gagné, que consiste en tres partes fundamentales, que son: verbo (en infinitivo y tercera persona; solo se usa uno por objetivo), acción (que es donde se aplica el verbo) y los condicionantes (tales como: porqué, para qué, dónde, qué, cuándo, dónde, etcétera; se colocan meramente los necesarios). A su vez para la utilización de verbos, se tienen en la escala de Bloom y Gagné, niveles diferentes que son estructurados, acorde al nivel deseado, lo cual cubre varias escalas, en orden.

***Elemento 3 del Artículo 1 del Aparte 1 Sección 0 - UNO - Confiabilidad***

Definir los principios fundamentales de confiabilidad aplicada a procesos productivos mediante los métodos de distribución Weibull. Nivel 1 – Conocer.

***Elemento 4 del Artículo 1 del Aparte 1 Sección 0 - DOS - Procesos***

Explicar técnicamente, la importancia de seguir con las metodologías y los pasos dentro de un proceso productivo para la obtención de la confiabilidad. Nivel 2 – Comprender.

***Elemento 5 del Artículo 1 del Aparte 1 Sección 0 - TRES - Técnica de confiabilidad de procesos***

Aplicar a procesos productivos, la medición de confiabilidad para lograr su optimización.

Nivel 3 - Aplicar.

***Elemento 6 del Artículo 1 del Aparte 1 Sección 0 - CUATRO - Resultados***

Establecer planes de mejora a los procesos productivos a partir de los resultados de confiabilidad mediante la evaluación de Weibull. Nivel 4 - Analizar.

***Elemento 7 del Artículo 1 del Aparte 1 Sección 0 - CINCO - Conclusiones***

Concluir los resultados obtenidos para dar un aporte al estudio de los procesos y comportamientos productivos.

***Tabla 1 - Niveles***

<b><i>Orden secuencial de Títulos</i></b>	<b><i>Nivel Bloom Gagné</i></b>	<b><i>Título de Capítulo</i></b>
<b><i>1 - Uno</i></b>	<b><i>Conocer</i></b>	<b><i>Confiabilidad</i></b>
<b><i>2 - Dos</i></b>	<b><i>Comprender</i></b>	<b><i>Procesos</i></b>
<b><i>3 - Tres</i></b>	<b><i>Aplicar</i></b>	<b><i>Técnica de confiabilidad</i></b>
<b><i>4 - Cuatro</i></b>	<b><i>Analizar</i></b>	<b><i>Resultados</i></b>
<b><i>5 - Cinco</i></b>		<b><i>Conclusiones</i></b>

Fuente (Suarez, 2017)

### Nivel de Profundidad de la escala Bloom & Gagné

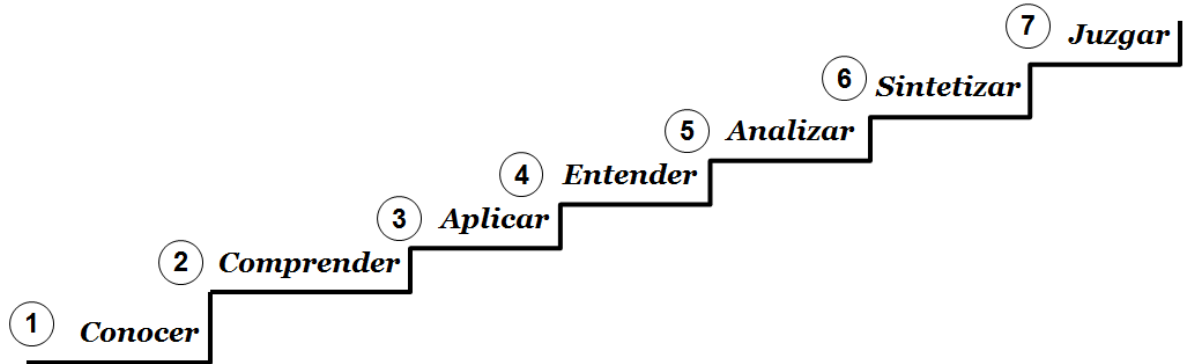


Figura 2 - Profundidad de los verbos de Bloom & Gagné

Fuente (Zapata, 2017) (Barret&Bloom@, Escalas Niveles Objetivos Barrett, Gagné y Bloom, 2012)

Verbos que se recomiendan para montar Objetivos en los Proyectos de Investigación, Tesis, Tesinas o Proyectos de fin de Carrera		3		4		5		6																																								
1		2		3		4		5		6																																						
CONOCER		COMPRENDER		APLICAR		ANALIZAR		SÍNTETIZAR		JUZGAR																																						
Definir	Repetir	Registrar	Memorizar	Nombrar	Relatar	Subrayar	Identificar	Interpretar	Traducir	Reafirmar	Describir	Reconocer	Explicar	Expresar, Revisar	Ubicar, Informar	Aplicar	Emplear	Utilizar	Demostrar	Practicar	Ilustrar	Operar, Dibujar	Programar, Esbozar	Distinguir, Analizar	Diferenciar	Calcular, Probar	Experimentar	Comparar, Criticar	Contrastar, Discutir	Diagramar, Debatir	Inspeccionar, Catalogar	Planear, Proponer	Diseñar	Formular	Reunir	Construir, Crear	Establecer	Organizar	Dirigir, Preparar	Juzgar	Evaluar	Clasificar	Estimar	Seleccionar	Valorar	Calificar	Escoger	Medir

Figura 3 - Verbos para configurar objetivos

Fuente (Zapata, 2017)

## **Aparte 2 - Sección 0 - Estructura del proyecto**

El proyecto profundiza en la medición de la confiabilidad mediante la distribución y las gráficas de Weibull, con el fin de ampliar los estudios que actualmente se tienen en mantenimiento, aplicarlos a producción y que sirvan como base para nuevos estudios comprensibles para los nuevos Ingenieros de mantenimiento y producción, los cuales poseen demasiada información, pero poco conocimiento.

La familiarización de los conceptos que se usan en este trabajo y la importancia de su implementación en la estimación de la confiabilidad, son explicados en el capítulo número uno.

En el capítulo dos se enseñan los métodos de cálculo y los conceptos para el entendimiento de los procesos que se deben tener en cuenta para la estimación y comprensión de la confiabilidad.

Con las explicaciones realizadas en los capítulos anteriores, en el capítulo tres, el autor aplica los conceptos y métodos de cálculo en procesos productivos, apoyándose en las fórmulas, gráficas y softwares necesarios que den validez a su teoría.

En el capítulo cuatro se realiza un análisis de los resultados obtenidos de la mejorada técnica de confiabilidad aplicada a los procesos productivos y en qué porcentaje se puede aplicar al mantenimiento.

## **Aparte 3 - Sección 0 - Justificación**

Una de las necesidades más importantes para la industria, en la actualidad, se basa en identificar si la ineficiencia radica en un problema de confiabilidad o de productividad, para ello

se estudia la base del proceso mediante los valores de falla o de probabilidad de éxito bajo la metodología Weibull, con simulaciones, para ver si es un caso de éxito o de fracaso en los procesos productivos e industriales. Es una novedosa aplicación industrial de fundamentación científica para analizar curvas de confiabilidad de procesos productivos de Weibull para determinar sus mejoras (Barringer@, 1997).

Basado en investigaciones anteriores, este trabajo entrega un aporte al estudio de la confiabilidad de procesos productivos mediante la distribución de Weibull, un método de análisis estadístico aplicado ampliamente al mantenimiento. La importancia del proyecto radica en implementar un método estadístico, consolidado, comprobado y revalidado en el área del mantenimiento, en otra área donde no se ha aplicado de una manera tan profunda este tipo de análisis como lo es en los procesos productivos.

#### **Aparte 4 - Sección 0 - Antecedentes**

La distribución de Weibull fue descubierta por el sueco Walodi Weibull y fue anunciada por primera vez en un escrito en 1951 e implementada por primera vez en una refinería en el año 1955. El análisis de Weibull es la técnica mayormente elegida para estimar la probabilidad debido a su utilidad para simular un amplio rango de distribuciones, como la normal, la exponencial, etc. Las técnicas usadas en la distribución de Weibull tienen una similitud con las distribuciones Normal y Log- Normal.

El enfoque en mantenimiento a nivel de Colombia y América Latina lo ha trabajado ampliamente el Doctor Alberto Mora quien ha producido durante su carrera varios libros en

donde explica el análisis Weibull aplicado a varios casos de mantenimiento. Esta distribución es útil debido a su buena implementación en el análisis de la curva de Davies<sup>2</sup>, propia del análisis de fallas que se trabaja en mantenimiento y se rige por un factor de forma, denominado  $\beta$ <sup>3</sup>. (Mora, Mantenimiento Estratégico, 2007)

El señor Paul Barringer tuvo una pasión por los estudios de confiabilidad aplicada a sistemas productivos para resolver problemas y reducir costos en las industrias de todo el mundo. En su página ([barringer1.com](http://barringer1.com)) se puede consultar diferentes temas sobre la confiabilidad en los procesos, clases sobre la implementación de Weibull en el papel y sus derivaciones, se pueden encontrar noticias sobre la distribución y programas desarrollados para el cálculo por medio de Weibull (se debe pagar para adquirir estos programas).

Los aportes del trabajo estarán basados en las referencias de conocimiento que se tienen del señor Paul Barringer, relacionándolos con el enfoque de mantenimiento que describe el Doctor Alberto Mora en su libro: *Mantenimiento Industrial Efectivo*.

---

<sup>2</sup> Curva donde se muestra la evolución en el tiempo de la tasa de fallas permitiendo seleccionar qué tareas de mantenimiento se deben desarrollar.

<sup>3</sup> Factor de forma que ayuda a determinar el punto de la curva de Davies en que se encuentra una máquina y qué tipo de mantenimiento se debe desarrollar.

### **Aparte 5 - Sección 0 - Conclusiones del Capítulo 0**

El capítulo describe y ordena las ideas acerca de lo que se va a representar dentro de este proyecto, conociendo toda la estructura y los objetivos alcanzables dentro del mismo.

Es importante dar una explicación previa al lector sobre los temas que se tratan en cada capítulo y el orden que lleva cada uno dependiendo de los objetivos específicos que el autor tiene para dar la explicación más clara de sus ideas, siendo lo más consecuente con la justificación y antecedentes del proyecto.

El trabajo realizado, representa una gran recopilación de datos, análisis y estudios obtenidos por medio de conocimientos como: análisis de fallas, planeación de mantenimiento, logística documental, RCM, acciones correctivas y manejo de pronósticos.

## **Sección 1 - Confiabilidad**

### **Aparte 1 - Sección 1 - Objetivo número 1**

Relatar los principios fundamentales de confiabilidad aplicada a los procesos productivos para ampliar los conocimientos de probabilidad que dan validez al estudio de la investigación.

Nivel 1 – Conocer.

### **Aparte 2 - Sección 1 - Introducción capítulo 1**

En este capítulo se pretende crear conocimiento al lector, familiarizándolo con los conceptos de confiabilidad que se trabajan en los cálculos aplicados a sistemas productivos. Estos conceptos son ampliamente conocidos en el estudio del mantenimiento, sin embargo, la idea es empezar a dar un acercamiento a la productividad y asociar los conceptos y metodologías a un mismo fin, calcular confiabilidad.

La confiabilidad como método de estudio en las áreas de producción, se convierte en la justificación de la planeación del mantenimiento dentro de una fábrica. La relación que se ha generado a lo largo de la historia entre ambas áreas depende única y exclusivamente de las máquinas, por lo tanto, existe gran similitud en las formas de estudio de la confiabilidad de los procesos.

### **Aparte 3 - Sección 1 - Desarrollo de capítulo 1**

Los conceptos que se muestran en esta sección son los fundamentos básicos para entender la metodología y como brinda los elementos necesarios para alcanzar los objetivos posteriores.

### **Artículo 1 del Aparte 3 Sección 1 - Confiabilidad**

La medida de la confiabilidad de un equipo, es la frecuencia con la cual ocurren las fallas en el tiempo, por lo tanto, si un equipo no tuviera fallas, sería 100% confiable. La tasa de fallas de un equipo está inversamente relacionada con la confiabilidad; a muchas fallas, poca confiabilidad y a pocas fallas, la confiabilidad es mayor (ESReDa-Industrial, 1998).

La calidad y la confiabilidad de un equipo<sup>4</sup> están estrechamente relacionadas, tomándose la calidad como la cantidad de satisfacción de los requerimientos que puedan tener los usuarios de un producto. Mientras que la confiabilidad se interesa por el tiempo que el producto puede prestar un servicio de una manera eficiente, después de entrar en operación. Una baja calidad del producto implica una disminución de su confiabilidad, de la misma manera que una calidad alta implica una confiabilidad elevada. (Mora, Mantenimiento Estratégico, 2007).

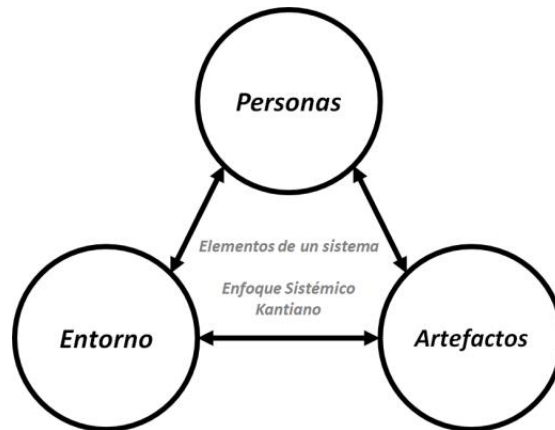
El problema es decidir si tiene un problema de confiabilidad con el equipo o un problema con el proceso de producción. Los diagramas de Weibull ayudan a explicar y categorizar los problemas en un formato visual comprensible para ingenieros, propietarios de procesos y administración (Barringer@, 1997).

---

<sup>4</sup> También abarca sistemas, unidades, componentes y en general, cualquier unidad que represente un seguimiento en el tiempo.

**Artículo 2 del Aparte 3 Sección 1 - Ingeniería de fábricas**

La ingeniería de fábricas se basa en el enfoque sistémico kantiano, el cual plantea la posibilidad de estudiar y entender cualquier fenómeno, explicando que un sistema está compuesto por tres elementos: personas, artefactos y entorno.



*Figura 4 - Elementos de un sistema Kantiano*

El modelo teórico define a cada departamento con módulos administrativos independientes (mantenimiento, producción, etc.) los cuales tienen unidades que conforman sistemas con metas propias, individuales y comunes al sistema (Mora, Mantenimiento Estratégico, 2007).

La unidad de producción se compone por tres elementos: Productores (personas), fábricas (entorno) y máquinas (artefactos); en donde la agregación de valor se compone por tres acciones básicas de producción: transformación, transporte o almacenamiento.

La unidad de mantenimiento se compone también por tres elementos, pero esta vez con diferentes denominaciones: Mantenedores (personas), sitios físicos en donde prestar el servicio de mantenimiento (entorno) y máquinas (artefactos). Para lograr la función propia de

mantenimiento, el sistema compone tres acciones básicas: reparar, mantener, construir (Chiavenato, 2005).

La ilustración anterior muestra que la relación entre los sistemas de producción y mantenimiento se hace a través de los equipos para un bien común en el rendimiento de la fábrica, mejorando los índices de disponibilidad. Por ende, para obtener una buena confiabilidad aplicada a los sistemas productivos es necesario una buena comunicación con el área de mantenimiento, ya que, sin la disponibilidad de equipos, no hay producción.

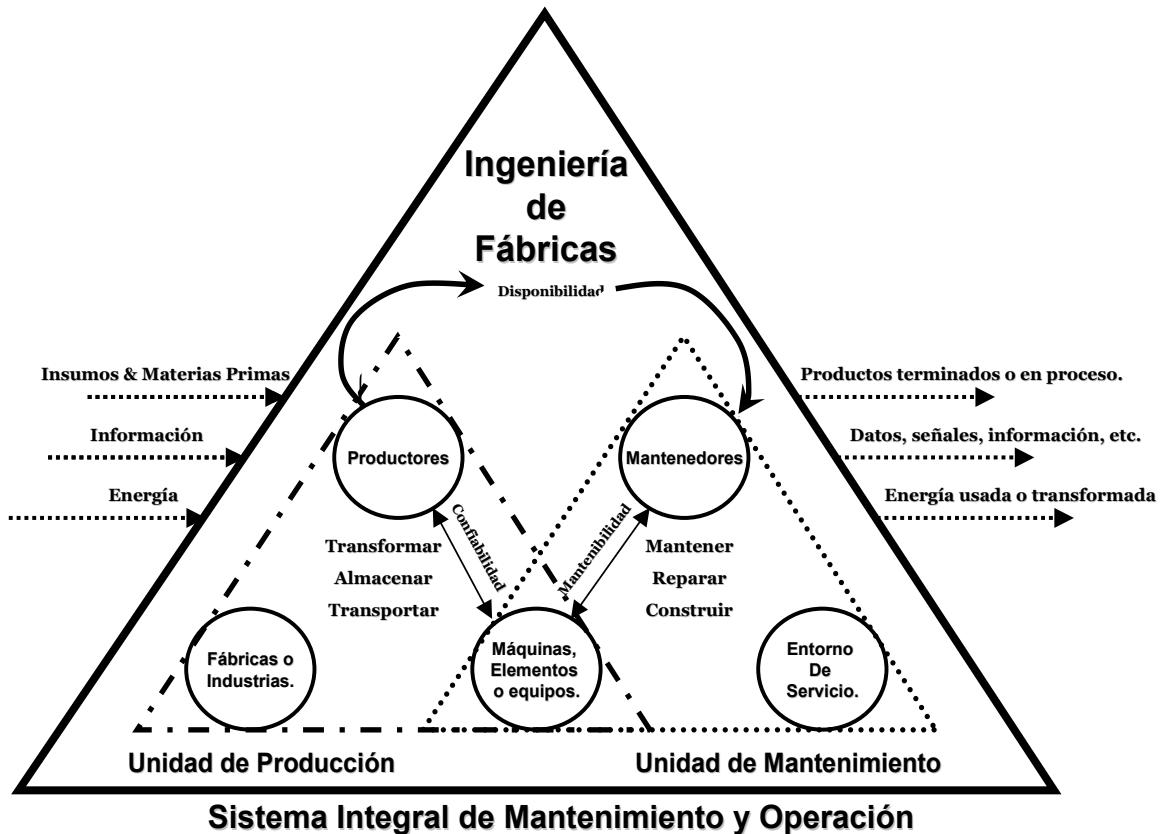


Figura 5 - Ingeniería de fábricas

Fuente (Mora, Mantenimiento Estratégico, 2007)

### **Artículo 3 del Aparte 3 Sección 1 - Relaciones**

Los elementos mantenimiento, producción y máquinas se relacionan entre sí a partir de premisas y normas de aceptación universal, así: la relación entre productores (producción) y máquinas la establecen los principios de la confiabilidad<sup>5</sup>, la relación entre mantenedores (mantenimiento) y máquinas se define por las reglas de la mantenibilidad, la relación entre mantenedores y productores se da por una relación indirecta a través de los equipos y está soportado por el concepto de disponibilidad.

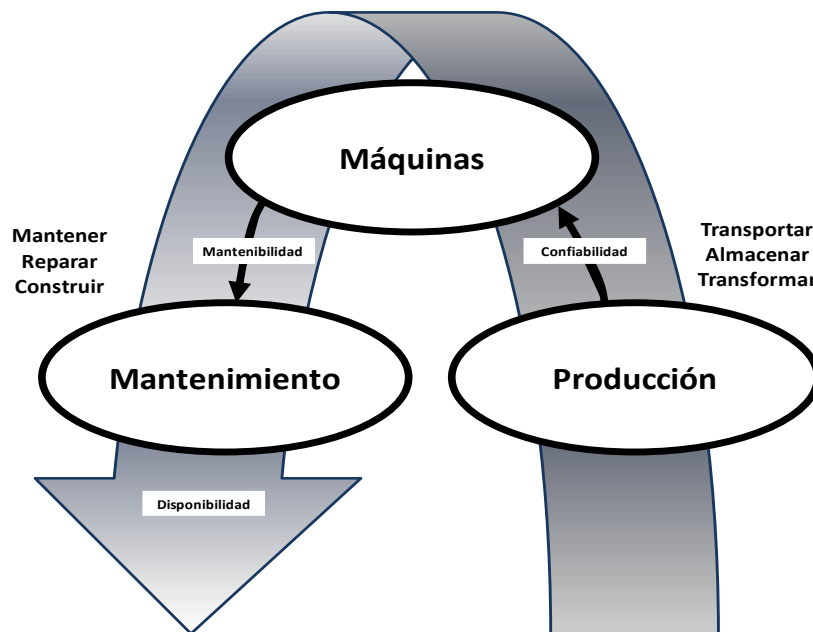
Las tácticas de mantenimiento que se usan con mayor énfasis a nivel mundial, son *TPM*, *RCM*, Proactiva, Reactiva, Clase Mundial, *PMO*, *RCM Scorecard*, centrada en objetivos, basada en riesgos, Terotecnológico, etcétera, fundamentan su establecimiento a partir de los indicadores CMD; los cuales proveen los principios básicos estadísticos y proyectivos de las dos manifestaciones magnas de mantenimiento: fallas y reparaciones.

La mejor forma de controlar el mantenimiento y sus implicaciones es a través del componente confiabilidad y parámetros asociados (Barringer@ H. P., 2005).

---

<sup>5</sup> El término asociado a confiabilidad en inglés es *Reliability*, pues también existe la palabra *Dependability* en el inglés que está asociada al CMD, pero es de un significado más supra, así al traducirla aparezca también como confiabilidad. Parece ser que *Dependability* está más asociada a la confiabilidad de la organización a que pertenezca la empresa a la cual se le evalúan equipos. También es importante señalar que en este trabajo los términos fiabilidad y confiabilidad son asumidos como idénticos.

La confiabilidad se mide a partir del número y duración de las fallas (tiempos útiles, reparaciones, tareas proactivas, etcétera.), la mantenibilidad se cuantifica a partir de la cantidad y de la duración de las reparaciones o mantenimientos planeados (tareas proactivas según J. Moubray - RCM II); mientras que la disponibilidad se mide (o se obtiene por cálculo y deducción matemática) a partir de la confiabilidad y de la mantenibilidad.



*Figura 6 - Elementos estructurales de Ingeniería de Fábricas*

Fuente (Mora, 2007).

#### **Artículo 4 del Aparte 3 Sección 1 - Confiabilidad y fallas**

La confiabilidad se puede entender como una característica propia del diseño de máquinas, que permite estudiar mediante principios científicos y matemáticos, las fallas de los elementos de los equipos, para el análisis de los procesos de un diseño, la determinación de los costos del ciclo vida y la seguridad de un producto (Nachlas, 1995). Los estudios de fiabilidad permiten llegar a

niveles de óptima confiabilidad, que producen mínimos costos del ciclo de vida para el usuario y minimizan los costos para el fabricante, sin comprometer confiabilidad y calidad (Reliasoft@, 2008).

La falla de un sistema se define como un evento que provoca la pérdida total o parcial de la capacidad de un equipo para realizar las funciones para las cuales se diseña. Un aparato, una máquina o un dispositivo se puede encontrar en uno de los dos posibles estados (mutuamente excluyentes): funciona o está en falla. Durante la vida útil el elemento se alterna entre *SoFa*<sup>6</sup> y *SoFu*<sup>7</sup>. Los estados del equipo se denominan perfil de funcionalidad (Knezevic, 1996).

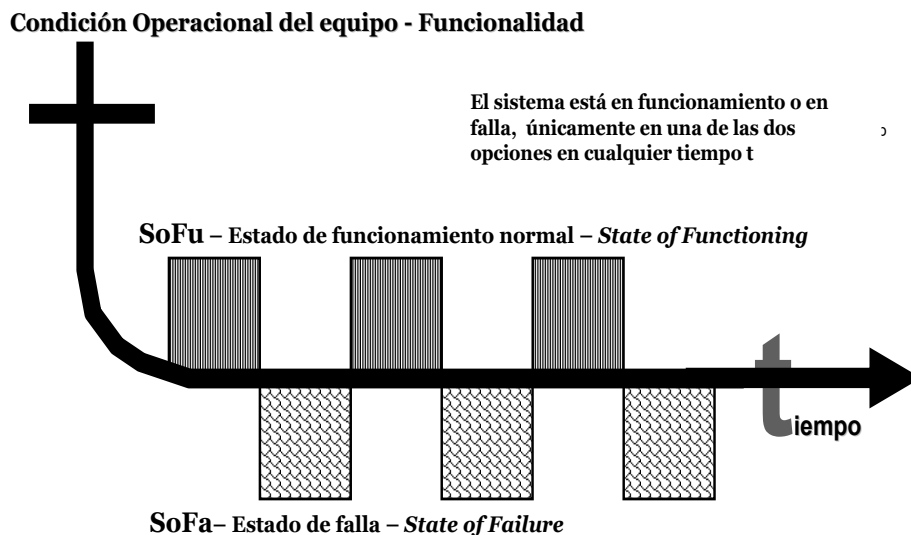


Figura 7 - Estado de funcionalidad

(Mora, Mantenimiento PHVA, 2009)

<sup>6</sup> *SoFa* - English - *State of Failure* - Castellano Estado de Falla.

<sup>7</sup> *SoFu* - English - *State of Function* - Castellano Estado de Funcionamiento normal.

Entre las ventajas del estudio científico y matemático del CMD, resalta que pretende buscar una metodología adecuada para medirlas y evaluarlas eficazmente, con el fin de brindar una herramienta fácil de usar para controlar la gestión y operación integral del mantenimiento, a la vez que permite predecir el comportamiento futuro de corto plazo de los equipos, en cuanto a fallas, reparaciones, tiempos útiles, etcétera (Mora, Mantenimiento Estratégico, 2007).

El autor aclara que con base a los estudios del sistema universal de medición CMD, se realizan los cálculos que enfocan al lector hacia los objetivos que tiene este trabajo; sin embargo, no entra a realizar una explicación con los pasos correspondientes en la explicación del método, ya que su enfoque es realizado y explicado en el libro Mantenimiento Industrial Efectivo del autor Alberto Mora G, en donde el enfoque es mantenimiento industrial.

Del Sistema Universal de Mantenimiento CMD se toman los métodos necesarios para llegar a la implementación de la distribución Weibull, en donde se realiza una adaptación para los sistemas productivos.

### **Artículo 5 del Aparte 3 Sección 1 - Estructura de la confiabilidad**

La probabilidad de que un equipo<sup>8</sup> desempeñe satisfactoriamente las funciones para las cuales se diseña, durante un período de tiempo específico y bajo condiciones normales de operación, ambientales y del entorno, se define como confiabilidad (Blanchard B. S., 1995)

---

<sup>8</sup> Cuando se refiere a un equipo, se abarcan sistemas, unidades, componentes y en general, cualquier elemento que represente una unidad lógica de seguimiento.

(Blanchard, Verma, & Peterson, 1994) (Ebeling, 2005) (Nachlas, 1995) (Ramakumar, 1996) (Sotskov, 1972) (Leemis, 1995) (O'Connor, 2002).

La definición de confiabilidad muestra que existen cuatro características que definen su estructura: probabilidad, desempeño satisfactorio, período y condiciones específicas:

### ***Elemento 1 del Artículo 5 del Aparte 3 Sección 1 - Probabilidad***

Las mediciones de CM<sup>9</sup> se hacen en términos de probabilidad, la cual se define en forma clásica, como el resultado de dividir el número de veces de los casos estudiados (intentos o eventos, favorables o no) entre el número total posible de casos (intentos o eventos); en la medida que la cantidad de intentos o casos posibles sea mayor la probabilidad se vuelve más exacta y cercana al valor real.

Por ejemplo, la probabilidad de un desempeño eficaz durante 80 horas de 0.75 (o 75%), indica que el equipo funciona satisfactoriamente 75 veces de cada 100 ensayos, durante al menos 80 horas (Blanchard, Verma, & Peterson, 1994).

### ***Elemento 2 del Artículo 5 del Aparte 3 Sección 1 - Desempeño satisfactorio***

Este indica que se deben establecer criterios específicos para describir lo que se considera, como una operación satisfactoria. Una combinación de factores cualitativos y cuantitativos definen las funciones que el sistema (equipo) debe lograr, usualmente son las especificaciones

---

<sup>9</sup> CM - Confiabilidad Mantenibilidad.

del sistema (Blanchard, Verma, & Peterson, 1994). Implica además conocer cuándo el equipo falla y ya no se desempeña satisfactoriamente.

Para un automóvil, por ejemplo, un adecuado nivel de satisfacción es que se pueda desplazar, si es así, el auto se desempeña satisfactoriamente, aún si su radio se daña o ciertas luces no funcionan (Leemis, 1995).

### ***Elemento 3 del Artículo 5 del Aparte 3 Sección 1 - Período***

Es la variable aleatoria de la definición de confiabilidad y se refiere a la duración del funcionamiento o longitud de vida; no necesariamente tiene que ser dado en horas, días, meses o años; de acuerdo con el sistema, el tiempo se puede medir con un reloj, el tiempo exacto de operación, el número de ciclos de operación o incluso en otras medidas como kilómetros recorridos, como es el caso de las llantas de un automóvil (Ebeling, 2005) (Ramakumar, 1996).

El análisis de dicha variable aleatoria implica el uso de las distribuciones de probabilidad, que deben ser modelos razonables de la dispersión de los tiempos de vida (Nachlas, 1995).

### ***Elemento 3 del Artículo 5 del Aparte 3 Sección 1 - Condiciones de operación***

Son las circunstancias en las que se espera que el equipo funcione, y constituyen el cuarto elemento relevante de la definición básica de confiabilidad; incluyen factores como ubicación geográfica donde se espera que el equipo opere, el medio ambiente, vibraciones, transporte, almacenamiento, empaque, cantidad de la carga, etcétera (Ramakumar, 1996).

### **Artículo 6 del Aparte 3 Sección 1 - Confiabilidad en los procesos**

Lo que no se mide, no se controla, y los indicadores dentro de una compañía son la herramienta más útil para la toma de decisiones, saber qué se debe medir y por qué se debe medir, son preguntas que resultan obvias, pero son necesarias en los estudios que se hacen en el mantenimiento, con el fin de controlar la funcionalidad de las máquinas y por ende, brindar confiabilidad a producción.

Las propuestas de medición, los procedimientos que se deben realizar, los cálculos necesarios para entender los indicadores de mantenimiento y producción son explicados a continuación.

#### ***Elemento 1 del Artículo 6 del Aparte 3 Sección 1 - Disponibilidad***

Es la probabilidad de que el equipo funcione satisfactoriamente en el momento en que sea requerido después del comienzo de su operación, cuando se usa bajo condiciones estables, donde el tiempo total considerado incluye el tiempo de operación, tiempo activo de reparación, tiempo inactivo, tiempo en mantenimiento preventivo (en algunos casos), tiempo administrativo, tiempo de funcionamiento sin producir y tiempo logístico.

#### ***Ecuación 1 - Función de disponibilidad***

$$Disponibilidad = \frac{Confiabilidad}{Confiabilidad + Mantenibilidad}$$

Fuente (Mora, 2007)

Una de las fases del Sistema Universal de Medición CMD, es reconocer qué tipo de disponibilidad puede manejar la organización. La disponibilidad genérica puede usarse como piloto en las empresas que no usan CMD y que son desorganizadas; la disponibilidad inherente es muy usada cuando se quieren tener en cuenta mantenimientos no planeados; la disponibilidad alcanzada es perfecta cuando se quieren tener en cuenta los parámetros de la inherente y además de los mantenimientos planeados.

Las disponibilidades operacional y operacional generalizada son útiles en plantas que tienen un alto nivel de organización y pueden controlar muchos factores. La disponibilidad operacional incluye todo lo que trae las anteriores disponibilidades e incluye los tiempos de paro por demoras logísticas; mientras que la disponibilidad operacional generalizada incluye todos los tiempos de las disponibilidades anteriores e incluye los tiempos en que la máquina está en operación, pero no produce.

Disponibilidad factible de calcular o deseada de utilizar				
Genérica	Inherente o Intrínseca	Alcanzada	Operacional	Operacional Generalizada
<p>Es útil cuando no se tienen desglosados los tiempos de reparaciones o de mantenimientos planeados; o cuando no se mide con exactitud ni los tiempos logísticos, ni administrativos ni los tiempos de demoras por repuestos o recursos humanos que afecten el DT.</p> <p>No asume que los UT sean altos y los DT bajos. Es útil al iniciar procesos CMD, engloba todas las causas.</p> <p>Debe usarse entre 2 y n eventos.</p>	<p>Considera que la no funcionalidad del equipo es inherente no más al tiempo activo de reparación.</p> <p>No incluye los tiempos logísticos, ni los tiempos administrativos ni los tiempos de demora en suministros. Asume idealmente que todo está listo al momento de realizar la reparación.</p> <p>Se debe cumplir que los UT sean muy superiores en tiempo a los MTTR (al menos unas 8 o más veces) y que DT tienda a cero en el tiempo.</p>	<p>Tiene en cuenta tanto las reparaciones correctivas, como los tiempos invertidos en mantenimientos planeados (preventivo y/o predictivos); no incluye los tiempos logísticos, ni los tiempos administrativos, mora en suministros.</p> <p>Los mantenimientos planeados pueden disminuir la disponibilidad alcanzada al realizarlos muy frecuentemente, aún cuando puede incrementar el MTBM.</p>	<p>Comprende a efectos de la no funcionalidad el tener en cuenta: los tiempos activos de reparación correctiva, los tiempos de mantenimientos planeados (preventivos o predictivos), los tiempos logísticos (preparación, suministros de repuestos o recursos humanos) y tiempos administrativos, las demoras, etc.</p> <p>Es útil cuando existen equipos en espera para mantenimiento.</p>	<p>Se sugiere cuando los equipos no operan en forma continua, o en los eventos en que el equipo está disponible pero no produce.</p> <p>Es necesaria cuando se requiere explicar los tiempos no operativos exentos ya de: los de los cálculos de mantenimientos reparaciones imprevistas, como del detalle logístico o demora del MITR.</p> <p>Se usa cuando las máquinas están listas (<i>ready time</i>), es decir operan en vacío.</p>

Figura 8 - Tipos de disponibilidades

Fuente (Mora, 2007).

***Elemento 2 del Artículo 6 del Aparte 3 Sección 1 - Cálculos confiabilidad***

Como explica anteriormente, es la probabilidad de que un equipo desempeñe satisfactoriamente las funciones para las cuales se diseña, durante un período de tiempo específico y bajo condiciones normales de operación, ambientales y del entorno.

Para los cálculos correspondientes a la confiabilidad, se utilizan siempre los tiempos en que la máquina opera sin fallas, o sea, los tiempos productivos. Dentro de una lista con estos tiempos productivos de la máquina, se deben organizar los datos de mayor a menor y eliminar aquellos que estén repetidos.

Existen métodos de estimación de la no confiabilidad, la cual se le da la determinación de  $F(t)$ . La idea del autor es explicar directamente los procedimientos que se deben usar para la estimación de la no confiabilidad, por eso explica los dos métodos precisos que se usan para dicha estimación.

**Parágrafo 1 del Elemento 2 del Artículo 6 del Aparte 3 Sección 1 – Método i-kaésimo o estimador no sesgado**

Este método es de los más sencillos y se usa para todos los datos de tiempos iniciales hasta el valor de la mitad, es decir si se tienen 7 datos se usa para los datos 1, 2, 3 y 4, en el caso de datos pares se usa en la primera mitad, ejemplo en seis datos se toma para los datos 1, 2 y 3.

*Ecuación 2 - Estimador i-kaésimo de No confiabilidad*

$$F(t_i) = 1 - R(t_i) = \frac{j}{N + 1}$$

Donde  $N$  es el número total de datos,  $j$  es el número consecutivo del dato que se evalúa.

Dentro de la ecuación, la confiabilidad tiene la representación de  $R(t)$  y es porque la no confiabilidad, es lo opuesto a la confiabilidad. (Mora, 2014)

Este método es expuesto porque es el mejor método de estimación de la no confiabilidad de la primera mitad de los datos. Es decir, de la mitad hacia arriba de los datos, este método es el que trae resultados más altos y por ende confiables.

### **Parágrafo 2 del Elemento 2 del Artículo 6 del Aparte 3 Sección 1 – Método de Rango de Medianas**

Éste es el valor que la probabilidad real de falla debe tener para la  $n$ -ésima falla o en una reparación para la  $n$ -ésima tarea correctiva, para una muestra de  $N$  datos con un nivel de confianza del 50%. Esto significa esencialmente que éste es el mejor estimativo para la no confiabilidad, en una población de datos (Mora, 2007) (Mora, Mantenimiento, 2014).

j \ N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	N \ j
1	0.5000	0.2929	0.2063	0.1591	0.1295	0.1091	0.0943	0.0830	0.0741	0.0670	0.0611	0.0561	0.0519	0.0483	0.0452	0.0424	0.0400	0.0378	0.0358	0.0341	0.0325	0.0310	0.0297	0.0285	0.0274	1
2		0.7071	0.5000	0.3857	0.3138	0.2645	0.2285	0.2011	0.1796	0.1623	0.1480	0.1360	0.1258	0.1170	0.1094	0.1027	0.0968	0.0915	0.0868	0.0825	0.0786	0.0751	0.0719	0.0690	0.0662	2
3			0.7937	0.6143	0.5000	0.4214	0.3641	0.3205	0.2862	0.2586	0.2358	0.2167	0.2005	0.1865	0.1743	0.1637	0.1542	0.1458	0.1383	0.1315	0.1253	0.1197	0.1146	0.1099	0.1055	3
4				0.8409	0.6862	0.5786	0.5000	0.4402	0.3931	0.3551	0.3238	0.2976	0.2753	0.2561	0.2394	0.2247	0.2118	0.2002	0.1899	0.1806	0.1721	0.1644	0.1573	0.1509	0.1449	4
5					0.8706	0.7356	0.6359	0.5598	0.5000	0.4517	0.4119	0.3785	0.3502	0.3258	0.3045	0.2859	0.2694	0.2547	0.2415	0.2297	0.2189	0.2091	0.2002	0.1919	0.1844	5
6						0.8909	0.7715	0.6795	0.6069	0.5483	0.5000	0.4595	0.4251	0.3954	0.3697	0.3471	0.3270	0.3092	0.2932	0.2788	0.2657	0.2538	0.2430	0.2330	0.2238	6
7							0.9057	0.7989	0.7138	0.6449	0.5881	0.5405	0.5000	0.4652	0.4348	0.4082	0.3847	0.3637	0.3449	0.3280	0.3126	0.2986	0.2858	0.2741	0.2632	7
8								0.9170	0.8204	0.7414	0.6762	0.6215	0.5749	0.5349	0.5000	0.4694	0.4423	0.4182	0.3966	0.3771	0.3594	0.3433	0.3286	0.3151	0.3027	8
9									0.9259	0.8377	0.7642	0.7024	0.6498	0.6046	0.5652	0.5306	0.5000	0.4727	0.4483	0.4263	0.4063	0.3881	0.3715	0.3562	0.3422	9
10										0.9330	0.8520	0.7833	0.7247	0.6743	0.6303	0.5918	0.5577	0.5273	0.5000	0.4754	0.4531	0.4329	0.4143	0.3973	0.3816	10
11											0.9389	0.8640	0.7996	0.7439	0.6955	0.6530	0.6153	0.5818	0.5517	0.5246	0.5000	0.4776	0.4572	0.4384	0.4211	11
12												0.9439	0.8742	0.8135	0.7606	0.7141	0.6730	0.6363	0.6034	0.5737	0.5469	0.5224	0.5000	0.4795	0.4605	12
13													0.9481	0.8830	0.8257	0.7753	0.7306	0.6908	0.6551	0.6229	0.5937	0.5671	0.5428	0.5205	0.5000	13
14														0.9517	0.8906	0.8364	0.7882	0.7453	0.7068	0.6721	0.6406	0.6119	0.5857	0.5616	0.5395	14
15															0.9548	0.8973	0.8458	0.7998	0.7585	0.7212	0.6874	0.6567	0.6285	0.6027	0.5789	15
16																0.9576	0.9032	0.8542	0.8101	0.7703	0.7343	0.7014	0.6714	0.6438	0.6184	16
17																	0.9601	0.9085	0.8617	0.8195	0.7811	0.7462	0.7142	0.6849	0.6579	17
18																		0.9622	0.9132	0.8685	0.8279	0.7909	0.7570	0.7259	0.6973	18
19																			0.9642	0.9175	0.8747	0.8356	0.7999	0.7670	0.7368	19
20																				0.9659	0.9214	0.8803	0.8427	0.8081	0.7762	20
21																					0.9675	0.9249	0.8854	0.8491	0.8157	21
22																						0.9690	0.9281	0.8901	0.8551	22
23																							0.9703	0.9311	0.8945	23
24																								0.9715	0.9338	24
25																									0.9727	25
j \ N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	N \ j

j \ N	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	N \ j
1	0.0263	0.0254	0.0245	0.0236	0.0228	0.0221	0.0214	0.0208	0.0202	0.0196	0.0191	0.0186	0.0181	0.0176	0.0172	0.0168	0.0164	0.0160	0.0156	0.0153	0.0150	0.0146	0.0143	0.0141	0.0138	1
2	0.0637	0.0614	0.0592	0.0572	0.0553	0.0536	0.0519	0.0503	0.0489	0.0475	0.0462	0.0450	0.0438	0.0427	0.0416	0.0406	0.0396	0.0387	0.0379	0.0370	0.0362	0.0355	0.0347	0.0340	0.0333	2
3	0.1015	0.0978	0.0944	0.0912	0.0881	0.0853	0.0827	0.0802	0.0779	0.0757	0.0736	0.0716	0.0698	0.0680	0.0663	0.0647	0.0632	0.0617	0.0603	0.0590	0.0577	0.0565	0.0553	0.0542	0.0531	3
4	0.1394	0.1343	0.1296	0.1252	0.1210	0.1172	0.1136	0.1102	0.1069	0.1039	0.1011	0.0984	0.0958	0.0934	0.0910	0.0888	0.0867	0.0847	0.0828	0.0810	0.0793	0.0776	0.0760	0.0744	0.0730	4
5	0.1774	0.1709	0.1648	0.1592	0.1540	0.1491	0.1445	0.1401	0.1360	0.1322	0.1286	0.1251	0.1218	0.1187	0.1158	0.1130	0.1103	0.1078	0.1054	0.1030	0.1008	0.0987	0.0966	0.0947	0.0928	5
6	0.2153	0.2074	0.2001	0.1933	0.1869	0.1809	0.1754	0.1701	0.1651	0.1605	0.1561	0.1519	0.1479	0.1442	0.1406	0.1372	0.1339	0.1308	0.1279	0.1251	0.1224	0.1198	0.1173	0.1149	0.1127	6
7	0.2533	0.2440	0.2354	0.2274	0.2199	0.2128	0.2063	0.2001	0.1943	0.1888	0.1836	0.1786	0.1740	0.1696	0.1654	0.1614	0.1575	0.1539	0.1504	0.1471	0.1439	0.1409	0.1380	0.1352	0.1325	7
8	0.2912	0.2806	0.2707	0.2614	0.2528	0.2447	0.2372	0.2301	0.2234	0.2170	0.2111	0.2054	0.2001	0.1950	0.1901	0.1855	0.1812	0.1770	0.1730	0.1692	0.1655	0.1620	0.1587	0.1555	0.1524	8
9	0.3292	0.3171	0.3059	0.2955	0.2858	0.2767	0.2681	0.2601	0.2525	0.2453	0.2386	0.2322	0.2261	0.2204	0.2149	0.2097	0.2048	0.2000	0.1955	0.1912	0.1871	0.1831	0.1794	0.1757	0.1722	9
10	0.3671	0.3537	0.3412	0.3296	0.3187	0.3086	0.2990	0.2900	0.2816	0.2736	0.2661	0.2590	0.2522	0.2458	0.2397	0.2339	0.2284	0.2231	0.2181	0.2133	0.2087	0.2043	0.2000	0.1960	0.1921	10
11	0.4051	0.3903	0.3765	0.3637	0.3517	0.3405	0.3299	0.3200	0.3107	0.3019	0.2936	0.2858	0.2783	0.2712	0.2645	0.2581	0.2520	0.2462	0.2406	0.2353	0.2303	0.2254	0.2207	0.2163	0.2120	11
12	0.4431	0.4269	0.4118	0.3978	0.3846	0.3724	0.3609	0.3500	0.3398	0.3302	0.3211	0.3125	0.3044	0.2966	0.2893	0.2823	0.2756	0.2693	0.2632	0.2574	0.2518	0.2465	0.2414	0.2365	0.2318	12
13	0.4810	0.4634	0.4471	0.4318	0.4176	0.4043	0.3918	0.3800	0.3690	0.3585	0.3487	0.3393	0.3305	0.3221	0.3141	0.3065	0.2992	0.2923	0.2857	0.2794	0.2734	0.2676	0.2621	0.2568	0.2517	13
14	0.5190	0.5000	0.4824	0.4659	0.4506	0.4362	0.4227	0.4100	0.3981	0.3868	0.3762	0.3661	0.3565	0.3475	0.3389	0.3307	0.3229	0.3154	0.3083	0.3015	0.2950	0.2888	0.2828	0.2771	0.2715	14
15	0.5570	0.5366	0.5176	0.5000	0.4835	0.4681	0.4536	0.4400	0.4272	0.4151	0.4037	0.3929	0.3826	0.3729	0.3637	0.3549	0.3465	0.3385	0.3308	0.3236	0.3166	0.3099	0.3035	0.2973	0.2914	15
16	0.5949	0.5732	0.5529	0.5341	0.5165	0.5000	0.4845	0.4700	0.4563	0.4434	0.4312	0.4197	0.4087	0.3983	0.3884	0.3791	0.3701	0.3616	0.3534	0.3456	0.3381	0.3310	0.3242	0.3176	0.3113	16
17	0.6329	0.6097	0.5882	0.5682	0.5494	0.5319	0.5155	0.5000	0.4854	0.4717	0.4587	0.4464	0.4348	0.4237	0.4132	0.4032	0.3937	0.3846	0.3760	0.3677	0.3597	0.3521	0.3448	0.3379	0.3311	17
18	0.6708	0.6463	0.6235	0.6023	0.5824	0.5638	0.5464	0.5300	0.5146	0.5000	0.4862	0.4732	0.4609	0.4492	0.4380	0.4274	0.4173	0.4077	0.3985	0.3897	0.3813	0.3733	0.3655	0.3581	0.3510	18
19	0.7088	0.6829	0.6588	0.6363	0.6154	0.5957	0.5773	0.5600	0.5437	0.5283	0.5138	0.5000	0.4870	0.4746	0.4628	0.4516	0.4410	0.4308	0.4211	0.4118	0.4029	0.3944	0.3862	0.3784	0.3709	19
20	0.7468	0.7195	0.6941	0.6704	0.6483	0.6276	0.6082	0.5900	0.5728	0.5566	0.5413	0.5268	0.5130	0.5000	0.4876	0.4758	0.4646	0.4539	0.4436	0.4338	0.4245	0.4155	0.4069	0.3987	0.3907	20
21	0.7847	0.7560	0.7294	0.7045	0.6813	0.6595	0.6392	0.6200	0.6019	0.5849	0.5688	0.5536	0.5391	0.5254	0.5124	0.5000	0.4882	0.4769	0.4662	0.4559	0.4461	0.4366	0.4276	0.4189	0.4106	21
22	0.8227	0.7926	0.7646	0.7386	0.7142	0.6915	0.6701	0.6500	0.6311	0.6132	0.5963	0.5804	0.5652	0.5508	0.5372	0.5242	0.5118	0.5000	0.4887	0.4779	0.4676	0.4578	0.4483	0.4392	0.4305	22
23	0.8606	0.8291	0.7999	0.7727	0.7472	0.7234	0.7010	0.6800	0.6602	0.6415	0.6238	0.6071	0.5913	0.5763	0.5620	0.5484	0.5354	0.5231	0.5113	0.5000	0.4892	0.4789	0.4690	0.4595	0.4503	23
24	0.8985	0.8657	0.8352	0.8067	0.7801	0.7553	0.7319	0.7100	0.6893	0.6698	0.6514	0.6339	0.6174	0.6017	0.5868	0.5726	0.5591	0.5462	0.5338	0.5221	0.5108	0.5000	0.4897	0.4797	0.4702	24
25	0.9363	0.9022	0.8704	0.8408	0.8131	0.7872	0.7628	0.7400	0.7184	0.6981	0.6789	0.6607	0.6435	0.6271	0.6116	0.5968	0.5827	0.5692	0.5564	0.5441	0.5324	0.5211	0.5103	0.5000	0.4901	25

j \ N	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	N \ j
26	0.9737	0.9386	0.9056	0.8748	0.8460	0.8191	0.7937	0.7699	0.7475	0.7264	0.7064	0.6875	0.6695	0.6525	0.6364	0.6210	0.6063	0.5923	0.5789	0.5662	0.5540	0.5423	0.5310	0.5203	0.5099	26
27		0.9747	0.9408	0.9089	0.8790	0.8510	0.8247	0.7999	0.7766	0.7547	0.7339	0.7143	0.6956	0.6779	0.6611	0.6451	0.6299	0.6154	0.6015	0.5882	0.5755	0.5634	0.5517	0.5405	0.5298	27
28			0.9756	0.9428	0.9119	0.8828	0.8556	0.8299	0.8058	0.7830	0.7614	0.7410	0.7217	0.7034	0.6859	0.6693	0.6535	0.6385	0.6241	0.6103	0.5971	0.5845	0.5724	0.5608	0.5497	28
29				0.9764	0.9447	0.9147	0.8865	0.8599	0.8349	0.8113	0.7889	0.7678	0.7478	0.7288	0.7107	0.6935	0.6772	0.6615	0.6466	0.6323	0.6187	0.6056	0.5931	0.5811	0.5695	29
30					0.9772	0.9465	0.9173	0.8899	0.8640	0.8395	0.8165	0.7946	0.7739	0.7542	0.7355	0.7177	0.7008	0.6846	0.6692	0.6544	0.6403	0.6268	0.6138	0.6013	0.5894	30
31						0.9779	0.9481	0.9198	0.8931	0.8678	0.8440	0.8214	0.8000	0.7796	0.7603	0.7419	0.7244	0.7077	0.6917	0.6765	0.6619	0.6479	0.6345	0.6216	0.6093	31
32							0.9786	0.9497	0.9221	0.8961	0.8715	0.8481	0.8260	0.8050	0.7851	0.7661	0.7480	0.7307	0.7143	0.6985	0.6834	0.6690	0.6552	0.6419	0.6291	32
33								0.9792	0.9511	0.9243	0.8989	0.8749	0.8521	0.8304	0.8099	0.7903	0.7716	0.7538	0.7368	0.7206	0.7050	0.6901	0.6759	0.6622	0.6490	33
34									0.9798	0.9525	0.9264	0.9017	0.8782	0.8559	0.8347	0.8145	0.7952	0.7769	0.7594	0.7426	0.7266	0.7113	0.6965	0.6824	0.6689	34
35										0.9804	0.9538	0.9284	0.9042	0.8813	0.8594	0.8387	0.8189	0.8000	0.7819	0.7647	0.7482	0.7324	0.7172	0.7027	0.6887	35
36											0.9809	0.9551	0.9303	0.9067	0.8842	0.8628	0.8425	0.8230	0.8045	0.7867	0.7698	0.7535	0.7379	0.7230	0.7086	36
37												0.9814	0.9562	0.9320	0.9090	0.8870	0.8661	0.8461	0.8270	0.8088	0.7913	0.7746	0.7586	0.7432	0.7285	37
38													0.9819	0.9573	0.9337	0.9112	0.8897	0.8692	0.8496	0.8308	0.8129	0.7957	0.7793	0.7635	0.7483	38
39														0.9824	0.9584	0.9353	0.9133	0.8922	0.8721	0.8529	0.8345	0.8169	0.8000	0.7838	0.7682	39
40															0.9828	0.9594	0.9368	0.9153	0.8947	0.8749	0.8561	0.8380	0.8207	0.8040	0.7881	40
41																0.9832	0.9604	0.9383	0.9172	0.8970	0.8776	0.8591	0.8413	0.8243	0.8079	41
42																	0.9836	0.9613	0.9397	0.9190	0.8992	0.8802	0.8620	0.8446	0.8278	42
43																		0.9840	0.9622	0.9410	0.9208	0.9013	0.8827	0.8648	0.8476	43
44																			0.9844	0.9630	0.9423	0.9224	0.9034	0.8851	0.8675	44
45																				0.9847	0.9638	0.9435	0.9240	0.9053	0.8874	45
46																					0.9850	0.9646	0.9447	0.9256	0.9072	46
47																						0.9854	0.9653	0.9458	0.9271	47
48																							0.9857	0.9660	0.9469	48
49																								0.9860	0.9667	49
50																									0.9862	50
j \ N	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	N \ j

Figura 9 - Tablas de Rango de Mediana

Fuente: (Mora, Mantenimiento PHVA, 2009)

El método de Rangos de Mediana se utiliza de la mitad de los datos hacia el último, ya que junto con los valores de i-kaésimo son los que presentan valores más altos de probabilidades; ejemplo si tiene 5 datos, toma los valores 1, 2 y 3 de i-kaésimo y los valores de tiempo 3 y 4 de Tabla de Rangos de Mediana.

Datos de operación sin fallas (en horas) <i>TBF</i>	Datos de operación sin fallas. Ordenados de menor a mayor	$F(t) = j / N + 1$ Método i-kaésimo	$F(t)$ con Rango Medianas Tabla	$F(t)$ con aproximación Rango Medianas Benard	$F(t)$ con Kaplan-Meier Modificado K-M
110	110	14.29%	10.91%	10.94%	10.94%
330	120	28.57%	26.45%	26.56%	23.12%
120	220	42.86%	42.14%	42.19%	36.64%
220	220	57.14%	57.86%	57.81%	51.60%
220	220	71.43%	73.56%	73.44%	68.10%
220	330	85.71%	89.09%	89.06%	86.25%
<b>Media</b>		<b>50.00%</b>	<b>50.00%</b>	<b>50.00%</b>	<b>46.11%</b>

No. Dato <i>j</i>	Datos de operación sin fallas (en horas) <i>TBM</i>	Datos de operación sin fallas. Ordenados de menor a mayor	$M(t) = j / N + 1$ Método i-kaésimo	$M(t)$ con Rango Medianas Tabla	$M(t)$ con aproximación Rango Medianas Benard	$M(t)$ con Kaplan-Meier Modificado K-M
1	2	2	16.67%	12.95%	12.96%	12.96%
2	26	3	33.33%	31.38%	31.48%	27.67%
3	34	9	50.00%	50.00%	50.00%	44.29%
4	3	26	66.67%	68.62%	68.52%	62.97%
5	9	34	83.33%	87.06%	87.04%	83.91%
<b>Media</b>		<b>50.00%</b>	<b>50.00%</b>	<b>50.00%</b>	<b>50.00%</b>	<b>46.36%</b>

Figura 10 - Tablas de  $F(t)$  o  $M(t)$  con datos pares e impares respectivamente

Fuente: elaboración propia

**Parágrafo 3 del Elemento 2 del Artículo 6 del Aparte 3 Sección 1 – Método Benard o de aproximación de Rango de Medianas**

Es un método que se fundamenta en las Tablas de Rango de Mediana, es una excelente opción en caso de no disponer de ellas.

*Ecuación 3 - Método de Benard Aproximación de Rango de Medianas*

$$R - M = \frac{j - 0.3}{N + 0.4} =$$

Fuente (Reliasoft@, 2008).

Donde:  $R-M$ : es el estimador de no confiabilidad o mantenibilidad de rango de mediana.  $j$ : posición del dato ordenado de menor a mayor.  $N$ : número total de datos.

De la mitad de los datos hacia abajo, el mejor método estimador de la no confiabilidad es éste, aunque no sea igual de precisa que la tabla.

**Parágrafo 4 del Elemento 2 del Artículo 6 del Aparte 3 Sección 1 – Método Kaplan & Meyer**

Es un método alternativo al estimador de rango de mediana, para calcular el valor de la no confiabilidad que también utiliza el número de datos de la muestra. Desafortunadamente siempre da valores más bajos que los otros tres métodos, a excepción de los extremos; lo que hace que sea poco útil (Vallejo, y otros, 2004).

*Ecuación 4 - Método de estimación Kaplan-Meier para  $A_1$*

$$K - M = 1 - \prod_{j=1}^N \frac{N-j}{N-j+1}$$

donde K-M: estimado de no confiabilidad o mantenibilidad de Kaplan-Meier; j: posición del dato ordenada de menor a mayor; N: número total de datos.

Fuente: (Reliasoft@, 2008)

El estimador de Kaplan–Meier tiene la desventaja de dar en el último valor una no confiabilidad o mantenibilidad de cero, por lo cual su fórmula se ha modificado para que pueda usarse en los modelos de estimación gráfica y de mínimos cuadrados (NS@, 2005).

*Ecuación 5 - Método de estimación Kaplan-Meier Modificado para  $A_1$*

$$K - M M = 1 - \frac{N+0.7}{N+0.4} \prod_{j=1}^N \frac{N-j+0.7}{N-j+1.7}$$

donde K-M M es el estimado de no confiabilidad o mantenibilidad de Kaplan-Meier Modificado; j: posición del dato ordenado de menor a mayor y N: número total de datos

Fuente: (NS@, 2005)

**Parágrafo 6 del Elemento 2 del Artículo 6 del Aparte 3 Sección 1 –**

**Desarrollo técnico de cálculos Confiabilidad**

En este momento el proceso va en la Metodología Universal de Cálculos Confiabilidad, de la siguiente manera.

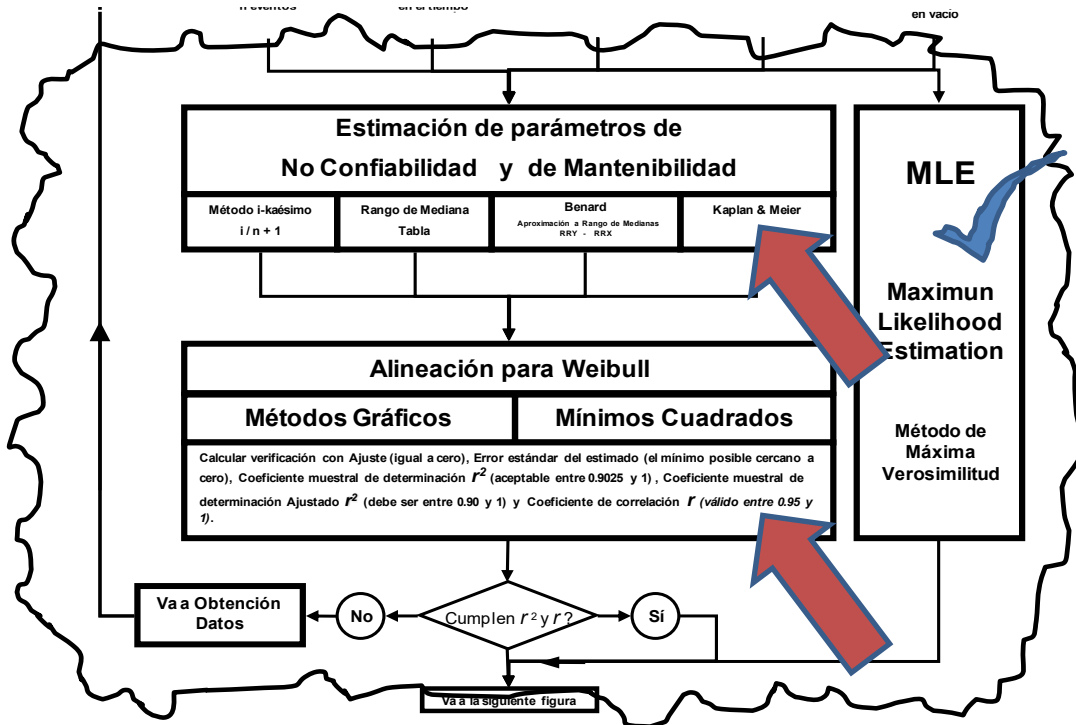


Figura 11 - Estado del cálculo Confiabilidad

Fuente: (Mora, Mantenimiento PHVA, 2009)

### Parágrafo 7 del Elemento 2 del Artículo 6 del Aparte 3 Sección 1 –

#### Alineación - Cálculos Confiabilidad

El método de Alineación es vital en los procedimientos para determinar la confiabilidad, se prosigue con la explicación de la alineación que se debe realizar para encontrar los parámetros básicos de la distribución Weibull. La distribución de Weibull posee en su forma general tres parámetros, lo que le da una gran flexibilidad y cuya selección y ajuste adecuado permite obtener mejores ajustes, que con otras distribuciones (Rojas, 1975); estos parámetros son:

Gamma - Parámetro de posición ( $\gamma$ ): el más difícil de estimar y por este motivo se asume con demasiada frecuencia que vale cero. Indica el lapso en el cual la probabilidad de falla es nula (Forcadas, 1983).

Eta  $\eta$ - Parámetro de escala o característica de vida útil ( $\eta$ ): su valor es determinante para fijar la vida útil del producto o del sistema. Entre más alto las máquinas pueden ser más robustas o de trabajos de mayor duración.

Beta - Parámetro de forma ( $\beta$ ), refleja la dispersión de los datos y determina la forma que toma la distribución (Mora, 2007).

Los métodos por medio de los cuales se puede realizar la estimación de los parámetros de una distribución varían entre aquéllos que son más simples y unos más sofisticados; algunos de los más comunes para realizar esta tarea son el método gráfico, el método de mínimos cuadrados (o de regresión) y el método de la Máxima Verosimilitud *MLE* (Reliasoft@, 2008).

Método de mínimos cuadrados: la distribución de Weibull responde a los parámetros  $\beta$  y  $\eta$ ; que representan respectivamente el factor de forma y de escala de la distribución; la obtención de estos parámetros se logra por medio de la alineación de la distribución de Weibull mediante las transformaciones necesarias, luego de la obtención de la pendiente y el intercepto de la recta se calculan los parámetros  $\beta$  y  $\eta$  de la distribución (Reliasoft@, 2008).

*Ecuación 6 - Transformación en Weibull para los valores Y y X*

$$Y_j = Ln \left[ Ln \left( \frac{1}{1 - F(t_j)} \right) \right]$$

$$X_j = Ln(t_j)$$

para el caso de no confiabilidad  $F(t_j)$ .

$$Y_j = Ln \left[ Ln \left( \frac{1}{1 - M(t_j)} \right) \right]$$

$$X_j = Ln(t_j)$$

para el caso de Mantenibilidad  $M(t)$

Los valores  $t_i$  (tiempos de falla o de reparación),  $F(t_i)$  y  $M(t_i)$  son los que se obtienen por el método de estimación i-kaésimo o por cualquiera de los dos métodos de rango de mediana (Tabla o Benard).

Los valores de la pendiente  $b$  y de la intersección  $a$  de la recta alineada permiten estimar los parámetros de escala  $\eta$  y forma  $\beta$ , mediante las siguientes expresiones

*Ecuación 7 - Parámetros de Weibull*

$$\text{Parámetro de Escala } \eta = e^{\left[ -\frac{\alpha}{\beta} \right]} = e^{\left[ -\frac{\text{Intersección}}{\text{Pendiente}} \right]}$$

$$\text{Parámetro de Forma } \beta = \beta = b = \text{Pendiente estimada de la recta Alineada}$$

Fuente: (Reliasoft@, 2008)

La vida útil o Tiempo Medio entre Fallas *MTBF* se puede estimar a partir de

*Ecuación 8 - Fórmula para hallar el tiempo medio entre fallas*

$$MTBF = \eta * Función\ Gamma \left( 1 + \frac{1}{1 + \beta} \right)$$

Fuente (Kececioglu, 1995)

Donde  $\eta$  parámetro de escala y  $\beta$  es el de forma, con función Gamma para la estimación.

Después de comprender las fórmulas necesarias para encontrar los factores básicos de la distribución Weibull, se presentan las fórmulas en donde encontraremos los resultados de los indicadores que necesitamos para encontrar la eficiencia del sistema. Weibull en 1951 escribe la función empírica más sencilla que puede representar mejor una gran variedad de datos reales (Tamborero@, 2005).

*Ecuación 9 - Función de Weibull aplicada a confiabilidad*

$$R(t) = \exp \left[ - \int_0^{\infty} \lambda(t) * d(t) \right]$$

Donde  $R(t)$  es la función de confiabilidad y  $\lambda(t)$  es la función de tasa de fallas.

$$\int \lambda(t).dt = \left( \frac{t-t_0}{\eta} \right)^\beta$$

Reemplazando  $\lambda(t)$  en la función de confiabilidad, se obtiene entonces.

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\int_{t_0}^t \lambda(t).dt\right] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta\right]$$

Fuente: (Kececioglu, 1995)

### ***Elemento 3 del Artículo 6 del Aparte 3 Sección 1 - Mantenibilidad***

La probabilidad de que un elemento, máquina o dispositivo, pueda regresar nuevamente a su estado de funcionamiento normal después de una avería, falla o interrupción productiva (funcional o de servicio), mediante una reparación que implica la realización de unas tareas de mantenimiento, para eliminar las causas inmediatas que generan la interrupción (Mora, 2007).

Para los cálculos correspondientes a la mantenibilidad, se utilizan siempre los tiempos en que la máquina no opera, o sea, los tiempos improductivos a causa de las fallas. Para los cálculos en mantenibilidad se debe tener en cuenta que el  $M(t)$  se asocia a  $F(t)$  que representa la no confiabilidad, sin embargo, el cálculo es el mismo, pero algunos autores lo nombran no confiabilidad, se debe tener en cuenta son los datos que se van a utilizar para hacer los cálculos.

*Ecuación 10 - Distribución de Weibull aplicada a la no confiabilidad o mantenibilidad.*

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp\left[-\int \lambda(t)dt\right] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta\right]$$

Fuente: (Mora, 2007)

### ***Elemento 3 del Artículo 6 del Aparte 3 Sección 1 - Capacidad***

Tiene que ver con la salida de producción Porcentaje que puede trabajar una máquina en condiciones de normales de operación, dependiendo de las necesidades de producción y los tipos de proceso en los que esté trabajando.

La eficiencia mide el trabajo producido a la entrada versus la salida, y la utilización es el promedio del tiempo gastado en el esfuerzo para producir (Barringer@ P. H., Availability, Reliability, Maintainability and Capability, 1997).

Por ejemplo, si la eficiencia es de 80%, y la utilización es de 82,19% (solo se trabajan 300 días al año de 365). La capacidad será de  $0.82 * 0.8210 = 65,75\%$ . En términos generales este indicador es calculado por contabilidad para el departamento de producción.

### **Aparte 4 - Sección 1 - Conclusiones del Capítulo 1**

Tal como se explica en la ingeniería de fábricas, las máquinas son el factor común que une a la confiabilidad en los procesos, con el mantenimiento que se les aplica. Por lo tanto, se comprende la importancia de crear estrategias para lograr una prolongación de los tiempos de funcionamiento de una máquina, mediante una buena planeación del mantenimiento, lo cual

proporciona la confiabilidad a producción de tener unas máquinas en óptimas condiciones para trabajar.

Familiarizar al lector con la terminología, con los conceptos y las herramientas útiles en el estudio de la confiabilidad, es el primer paso para entender el por qué es importante la relación o vínculo entre las áreas de producción y mantenimiento dentro de una compañía o fábrica.

Los procedimientos para llegar a comprender los cálculos con las fórmulas propuestas por Weibull para el hallazgo de las funciones de confiabilidad y mantenibilidad tienen una gran similitud con los procedimientos propuestos en el Sistema Universal de Medición CMD, los conceptos y la metodología son los mismos, aunque no tienen el mismo nivel de profundidad.

## Sección 2 - Procesos

### Aparte 1 - Sección 2 - Objetivo número 2

DOS - Comprender - Explicar técnicamente, la importancia de seguir con las metodologías y los pasos dentro de un proceso productivo para la obtención de la confiabilidad.

### Aparte 2 - Sección 2 - Introducción capítulo 2

Esta sección presenta los procesos para comprender el análisis que deben tener los ingenieros de confiabilidad en la elaboración de un plan estratégico y de predicción aplicada a los sistemas productivos.

La estrategia de una organización se encuentra en su misión y en las mediciones de rendimiento<sup>10</sup> que se basan en el método de *VSP (Vital Signs Performance)* que permiten ir desde los objetivos globales, hacia los personales, cubriendo el todo: *Quantum Performance*. Las MR<sup>11</sup>s del *VSP* son definidos por los mantenimientos orientados hacia el cliente, costos tecnológicos, inventarios y CMD; siendo este último, como la metodología propuesta en la anterior sección en donde se ven implicados los análisis de confiabilidad aplicada a los procesos productivos. Una vez definidos las medidas de rendimiento (R.M.s) se pueden identificar los problemas y prevenirlos. (Akao, 1998)

---

<sup>10</sup> Transmiten la estrategia a todas las personas, lo cual permite entender como sus acciones y su rendimiento contribuyen al logro del sistema. Se pueden entender en el texto como M.R.

<sup>11</sup> MR - Medidas de Rendimiento

### **Aparte 3 - Sección 2 - Desarrollo de capítulo 2**

Los conceptos que se muestran en el capítulo son útiles para el entendimiento que tienen los procesos dentro de una organización, las medidas de rendimiento y la gestión que se puede realizar para la consecución de objetivos estratégicos.

#### **Artículo 1 del Aparte 3 Sección 2 - Ventajas de usar MRs**

Las mediciones de rendimiento definen qué es lo importante para cualquier organización, establecen la estrategia y proponen una mejora continua y sostenible. Transmiten la estrategia a todas las personas; permitiéndoles entender como sus acciones y rendimiento contribuyen al logro de esa estrategia. Estas M.R empresarial, se deben obtener a partir de la misión y visión de la empresa, las cuales deben ser entendidas por cada persona dentro de ella, ya que los controles y las mejores son comunes a todos. (American National Standard, 1997)

La comunicación asertiva y fluida entre todo el personal define los límites del sistema y hasta dónde cada individuo dentro de un equipo de trabajo puede llegar a hacer para lograr un objetivo común y así obtener la primera condición del M.R en los VSP en donde todo el equipo entiende los mismos objetivos y plazos para el logro.

Las medidas de rendimiento cuantifican el grado en que las actividades de un proceso o los resultados de éste consiguen un objetivo; por lo tanto, deben ser coherentes, fiables, basadas en hechos, patrones de escalas internacionales y no desde la intuición u opiniones. Las ventajas de usar las M.R son:

Tabla 2 - Ventajas de usar Medidas de Rendimiento

<i>Ventajas</i>	<i>Descripción</i>
1 - Satisfacer a los clientes en cada proceso	Medir a las personas de una empresa para lograr las metas de satisfacción de clientes y mantener la competitividad.
2 - Monitoreo de los logros obtenidos	Controlar las actividades y evaluar su consecución, para disminuir su número y así lograr más agilidad, calidad y menor costo.
3 - Benchmarking de actividades y procesos	Compararse con otras empresas permite un mejoramiento continuo.
4 - Promover el cambio en personas	Cambiar la forma de evaluar y medir a las personas, buscando motivación y mejora continua.

Fuente (American National Standard, 1997)

### Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 - Quantum Performance

Las medidas de rendimiento entrelazan la misión, la estrategia, los objetivos y los procesos con las actividades de la empresa, permitiendo hablar lenguajes comunes entre las personas internas. Existe una categorización de estas medidas de rendimiento en donde se evalúan tres temas muy importantes para cualquier empresa y son la base para medir el nivel de logro que se optimiza entre el valor y el servicio de una organización.

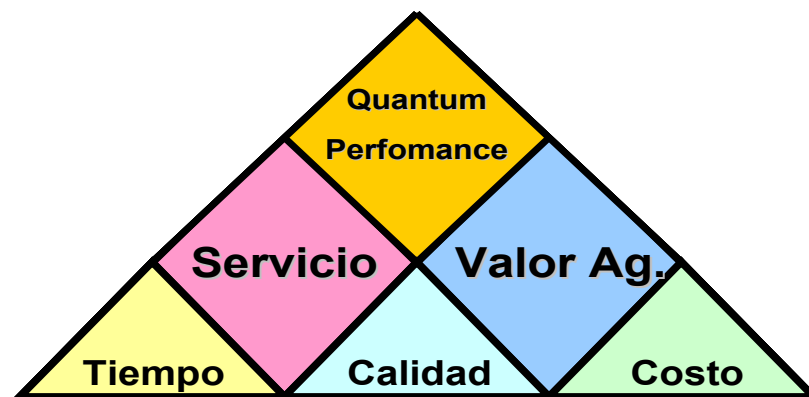


Figura 12 - Organización piramidal del Quantum Performance

Las empresas mejoran más allá del nivel de servicio y valor agregado propios, por encima del de sus competidores mundiales, es decir generan unas metas muy superiores a la competitividad en el mejoramiento continuo. Se centran en el *Quantum Performance* global mundial. (Jablonski, 1991)

***Elemento 1 del Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 – Categorías de rendimiento***

Las categorías de medidas de rendimiento son la base del *Quantum Performance* y su implementación se fundamenta en las personas internas de la compañía, que llevan las medidas de rendimiento a los altos niveles de la organización.

**Parágrafo 1 del Elemento 1 del Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 - Calidad**

Cuando se habla de calidad evaluada en las personas, se mide confiabilidad, credibilidad y competencia en donde se observan las habilidades y conocimientos de cada persona. La efectividad y la eficacia son medidas de calidad aplicadas a los procesos, las cuales se determinan con la conformidad y la productividad, respectivamente. Con la conformidad se evalúan las características técnicas requeridas en el proceso; mientras en la productividad se revisa el flujo del proceso, mientras se aumenta la calidad, disminuye el número de actividades, el recorrido de procesos, los tiempos y los costos.

Dentro de la organización, la calidad se evalúa mediante la empatía (adaptabilidad - Proceso), productividad (Proceso), fiabilidad (Personas), credibilidad (Personas) y competencia (Personas).

La empatía es la atención personalizada, por tanto, se mide la satisfacción individualizada del cliente externo o interno; a nivel de organización, la productividad se mide por medio de la competitividad; la fiabilidad es el rendimiento consistente y seguro a través de todos los procesos y la credibilidad es la idea o imagen que se tiene de quienes intervienen en los procesos. (Hronec & Hunt, 1992)

### **Parágrafo 2 del Elemento 1 del Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 - Tiempo**

El tiempo evalúa la responsabilidad y capacidad de adaptación del personal en la compañía, cuantifica la bondad del proceso en términos de velocidad o rapidez con la que se entrega un producto y flexibilidad para satisfacer demandas cambiantes de los clientes.

Como ya se viene mencionando, la organización está compuesta por personas y procesos, por lo tanto, el tiempo dentro de una organización depende de los indicadores evaluados hacia ellos, comprendiendo la velocidad, la flexibilidad y la capacidad de adaptación como factores importantes para la evaluación de este ítem.

### **Parágrafo 3 del Elemento 1 del Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 - Costo**

Los salarios y los beneficios son una forma de disminuir la desmotivación en las personas, entendiendo entonces que una persona motivada es el motor de mejoramiento continuo que necesita una compañía. Dentro de los costos a personas se incluye la formación y capacitación del personal, lo que implica un costo inicial alto, pero se refleja en el desempeño que tendrán los empleados en su adaptación al cargo.

A nivel de organización se toman en cuenta los estados financieros, los balances diarios de caja y la gestión estratégica de los costos. En este último entra el mantenimiento como parte importante de la preservación de activos y la baja generación de costos. La misión del mantenimiento es brindar al cliente (externo o interno) la disponibilidad de los activos necesarios para realizar una actividad determinada, con total confiabilidad y durante el tiempo que se necesiten. (Hronec & Hunt, 1992)

***Elemento 3 del Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 - Elementos de medición del Quantum Performance***

El método es un modelo sistemático, lógico, coherente y general para la implementación de medidas de rendimiento y para el análisis de Actividades-Procesos-Macroprocesos claves y críticos. La ventaja es que el modelo se inicia con la selección de la Estrategia global prioritaria, que se deriva en tres áreas: liderazgo, participantes y mejores prácticas. (Akao, 1998)

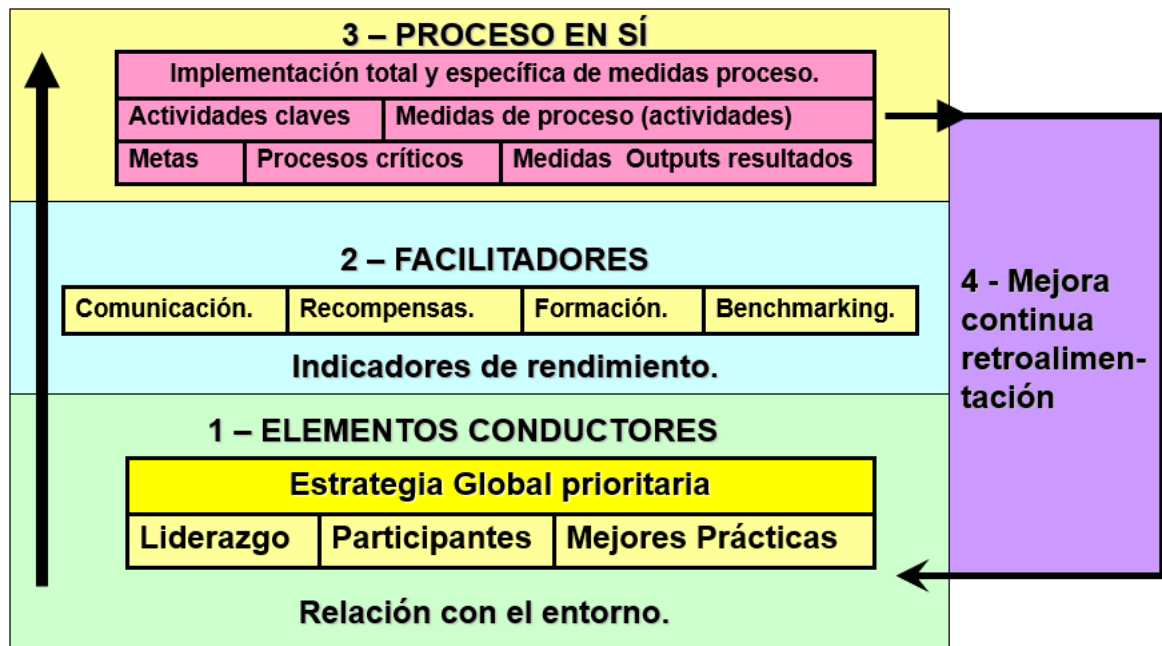


Figura 13 - Elementos del Quantum Performance

### **Parágrafo 1 del Elemento 3 del Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 -**

#### **Elementos conductores**

Empezamos por el liderazgo que aporta la dirección al sistema de gestión de rendimientos. El líder define estrategias y objetivos claves controlando el proceso de cambio e implementando indicadores que le ayuden a llevar un mejor control. El proceso evaluativo del grado de compromiso de los ejecutivos empieza a formar parte de los sistemas de medición del rendimiento.

La primera fase de toma de conciencia es una medida de competencia del liderazgo obtenido. Es la etapa de medición de la posesión de habilidades y conocimientos requeridos para el proceso. La segunda fase de adquisición es la medida a la resistencia del grupo líder, evaluando su flexibilidad y su actitud positiva hacia el cambio.

La tercera y última etapa es la evaluación de su característica principal como motor y líder del proceso continuo, su credibilidad. Los participantes son las personas, grupos o instituciones afectados y partícipes en las actividades, procesos, organización, macroprocesos, productos o servicios de una empresa. (Management, 1991)

En la cadena de valor, son los clientes internos o externos, empleados, trabajadores, directivos, funcionarios de todas las categorías, proveedores, agentes comercializadores, contratistas, accionistas, junta directiva, etcétera.

Las mejores prácticas conllevan rápidamente a las Organizaciones hacia el éxito permitiendo romper paradigmas. Una estrategia de mejores prácticas es conocer mejores

empresas para replantear las metas, objetivos y estrategias. El benchmarking deja que se puedan replantear modelos de gestión de indicadores a partir de la exitosa experiencia de otras organizaciones, adaptándoles a las necesidades particulares de la propia.

Las mejores prácticas ahorran tiempo y dinero, evitando cometer errores ya superados por otras empresas. El benchmarking ayuda a consolidar el liderazgo al aprender de otras compañías y se minimiza la arrogancia o complacencia entre clientes. (Camp, 1989)

### **Parágrafo 2 del Elemento 3 del Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 -**

#### **Facilitadores**

Los desarrolladores permiten a las empresas facilitar, generar, implementar y utilizar nuevas medidas del rendimiento permitiendo iniciar y mantener el cambio actitudinal en las personas y que éstas a su vez se hagan dueñas de los resultados del modelo.

La comunicación y la formación se utilizan para controlar, dirigir y gestar la intensidad del cambio. Las recompensas y el benchmarking se utilizan para controlar, dirigir y gestar la duración del cambio. La comunicación se debe desenvolver tanto en el ámbito vertical como horizontal, lo que garantiza un perfecto intercambio de ideas al través de la empresa, desde la base hasta la alta dirección.

La formación se debe desarrollar en forma continua para que todos los participantes adquieran las habilidades y competencias necesarias para implementar los sistemas de medición. La competitividad de una empresa se deriva de sus competencias, habilidades y productos esenciales. (Chappell, 1992)

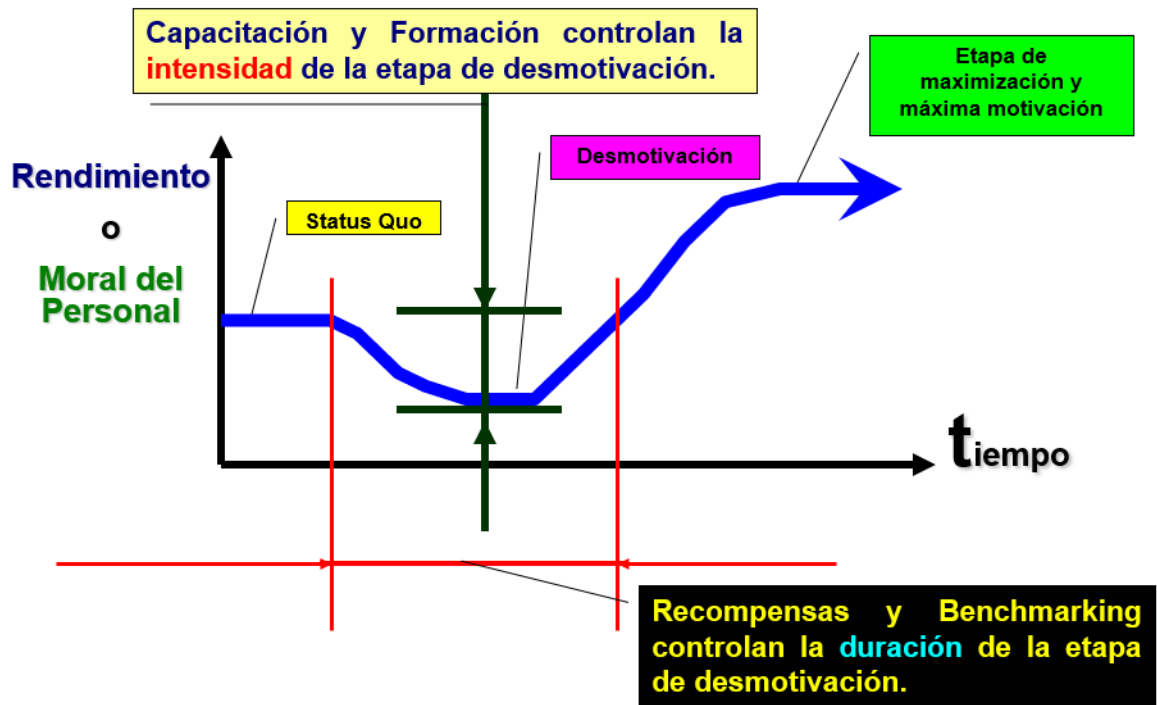


Figura 14 - Curva de motivación y desmotivación típica

La motivación solo se aumenta en el personal (cliente del sistema de indicadores) mediante lo que estos funcionarios hagan durante este tiempo; y la desmotivación sólo se disminuye con lo periférico: recompensas. (Chappell, 1992)

Los sistemas de recompensas siempre se deben diseñar bajo un modelo en donde todos ganen al menos en tres niveles positivos, pero nunca en dinero, sino con situaciones detectadas en las necesidades diarias del cliente interno siempre en coordinación con el premiado o motivado. Tiempo libre, reconocimiento público, viajes cortos, libros, capacitación, etc.

El Benchmarking permite un rápido aprendizaje de lo que se necesita cambiar. A partir del aprendizaje en otras organizaciones, se le logra ganar tiempo al tiempo, además que permite

reconocer que existen mejores formas de hacer las actividades y los procesos, permitiendo alcanzar más rápidamente el Quantum Performance y el ABO Quantum. Disminuyendo el tiempo de la desmotivación. (Camp, 1989)

**Parágrafo 3 del Elemento 3 del Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 - Proceso en sí**

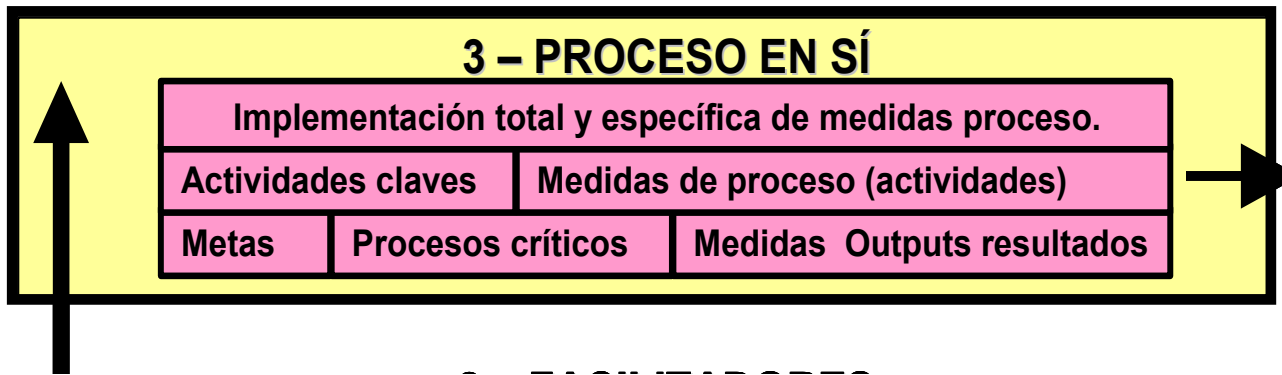


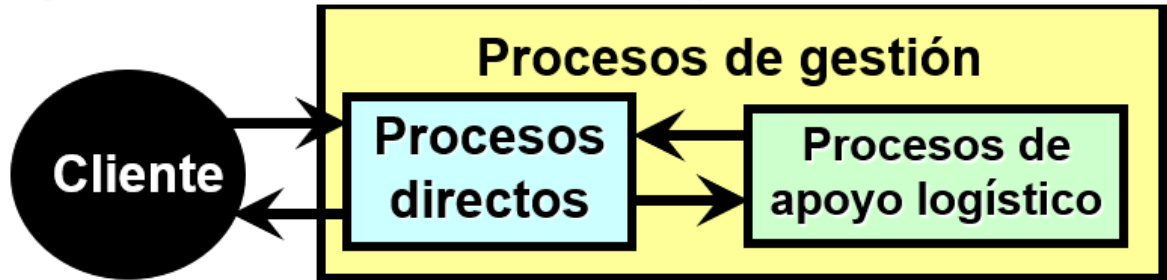
Figura 15 - Etapas del proceso en sí

Las metas son los valores deseados a futuro en los indicadores de rendimiento y procesos productivos, transforman en operaciones tangibles la estrategia de la empresa y convierten en actividades la estrategia global, las cuales en secuencia lógica generan los procesos. (Kankinson & Lloyd, 1992)

Un proceso es una serie lógica de actividades que utilizan recursos físicos y humanos, para generar un servicio o un producto, o una agregación de valor. La identificación de los procesos críticos y su estudio centrándose en ellos, le permite a la organización mejorar en forma continua en aquellos temas que le permitan supervivir.

Los procesos son transversales, si el estudio solo se centra en lo funcional de cada actividad o proceso, no se logra la mejora global, y el mejoramiento de cada uno dependerá solo del

anterior. Los procesos críticos requieren de la implementación de medidores de rendimiento para conseguir alcanzar en forma simultánea las metas de costo, calidad y tiempo, y que todo sea percibido por el cliente. (Juran & Gryna, 1989)



*Figura 16 - Proceso de gestión*

Los Procesos Directos son los primeros en sobresalir al hacer la búsqueda, centrada en el cliente: Entrega de mercancía. Los procesos de apoyo logístico contribuyen a los primarios para que se realicen: Elaboración de presupuestos o compras en el exterior. Los errores no los conoce el cliente. Y los procesos de gestión existen para que los otros dos funcionen: Planeación, producción y mantenimiento. (Blanchard, Verma, & Peterson, 1994)

Las medidas de rendimiento de salida sirven para informar sobre el nivel de logro de un proceso y se utilizan básicamente para controlar los recursos productivos y humanos. Estas medidas de rendimientos de salida deben incluir los parámetros de evaluación de costo, tiempo y calidad, y por ende se dimensionan valor y servicio.

Existe mucha información sobre costos, más sin embargo éstos no reflejan el todo. Falta calidad y tiempo. Aún, teniendo valor, falta el servicio y el cliente. Los costos no son puros ni siempre reflejan la realidad, a veces sufren muchas mutilaciones o transformaciones (ABC<sup>12</sup>).

Los costos operativos se generan directamente de la misión de la Empresa, se deben trabajar en los mini-períodos más pequeños y factibles posibles, no solo por batche de producción o unidad de venta; en éstos es importante resaltar su incidencia y su contribución porcentual a la rentabilidad total, sirven para controlar la productividad de la empresa. Costo de insumos directos e indirectos de la orden de trabajo en mantenimiento. (Domínguez, 1999)

Los costos financieros son las cuentas tradicionales en libros, balances mensuales y anuales, la historia e informes a terceros. Los costos estratégicos calculan el costo de producir un servicio, generar un producto, llevar a cabo con feliz término una orden de trabajo de mantenimiento. El procedimiento es ir de los costos financieros a los operativos y de allí a la visión financiera estratégica de largo plazo. Es decir, desplazarse en el sentido lógico del tiempo.

En los tiempos modernos, las empresas siguen dando mucho énfasis a la valoración del inventario, a las rotaciones de almacén y de mezcla del portafolio, a los informes financieros históricos. La forma de mejorar el costo del valor agregado está en los costos operativos y en los estratégicos. (Hronec & Hunt, 1992)

---

<sup>12</sup> ABC: Activity-Based Costing. (Costeo Basado en Actividades)

Para las medidas de resultados y salidas en el proceso productivo, se debe tener en cuenta una correcta identificación del cliente; detectar, entender y analizar las necesidades y expectativas de éste; filtrar y priorizar las expectativas, en relación con las metas y seguido con las estrategias; y por último, la implementación de los objetivos por medio del benchmarking.

Después de definir las metas, los procesos críticos y las mediciones de los resultados esperados con el cliente, viene el paso más crítico dentro de un proceso productivo. En el transcurso de este capítulo, se ha venido hablando de las medidas de rendimiento para el cliente, sin mencionar que, en este caso, el cliente es producción y el proveedor de servicio es mantenimiento. Por lo tanto, el siguiente paso busca transformar la cultura del mantenimiento, integrando el análisis, simplificando y mejorando los procesos. (Propia)

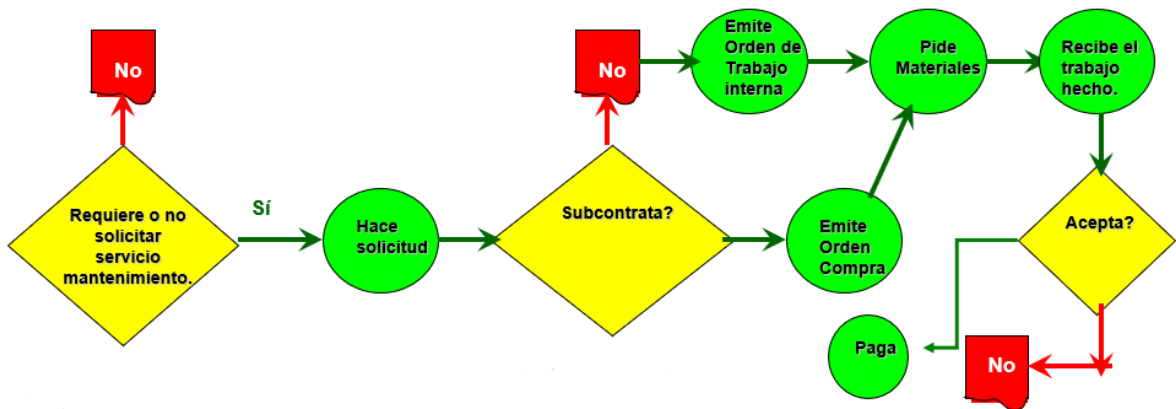


Figura 17- Un diagrama de flujo permite describir el proceso, mediante un flujo de acciones y decisiones

Para comprender un proceso es importante utilizar herramientas de gestión, con las cuales se obtienen representaciones de las actividades, a través de las funciones. El grupo de mantenimiento estratégico debe organizar el proceso logístico, costear las actividades y medir la

disponibilidad técnica con ayuda de órdenes de trabajo y la implementación de metodologías como el CMD o Six Sigma.

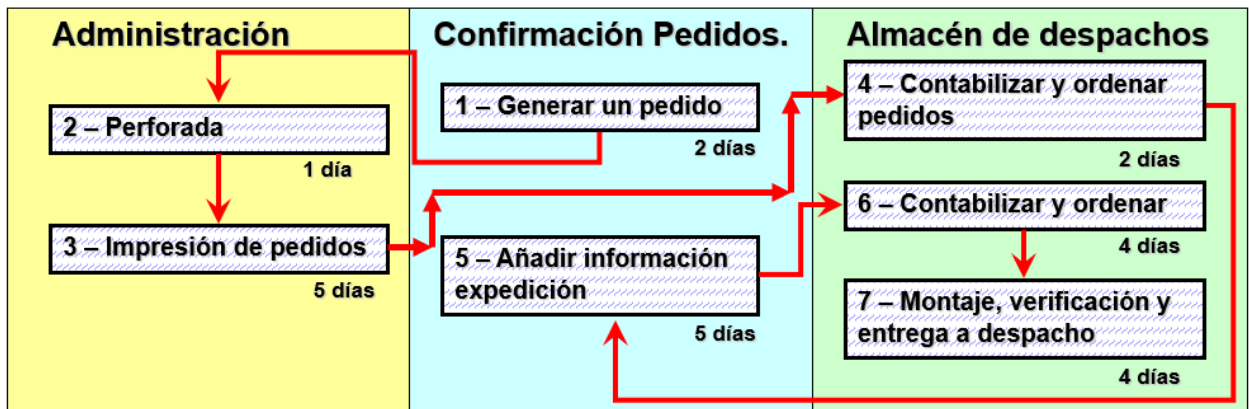


Figura 18- Gráfico interfuncional muestra las diferentes partes de funciones que intervienen en un proceso

Dentro de otras herramientas básicas de procesos para la recopilación de actividades están: Diagrama de causa y efecto, gráfica de Pareto, histograma, hoja de verificación, diagrama de dispersión, gráfica de control, representación gráfica del proceso. (Akao, 1998)

Lo que no se mide no se controla, por lo tanto, las medidas en los procesos sirven para anticiparse y prevenir los problemas, realizando mejora continua y controlando el proceso en sí. Sin medidas no es posible controlar ni mejorar las actividades clave de un proceso. Son las mismas personas que valoran y controlan los procesos mediante su permanente evaluación.

El éxito de la implementación es seguir los pasos recomendados desde el desarrollo y validación del sistema de control hasta la revisión y evaluación de la mejora continua en actividades, procesos y organización (macroprocesos). Las mismas personas dueñas de las actividades participan en el diseño, implementación y cuantificación de las medidas de

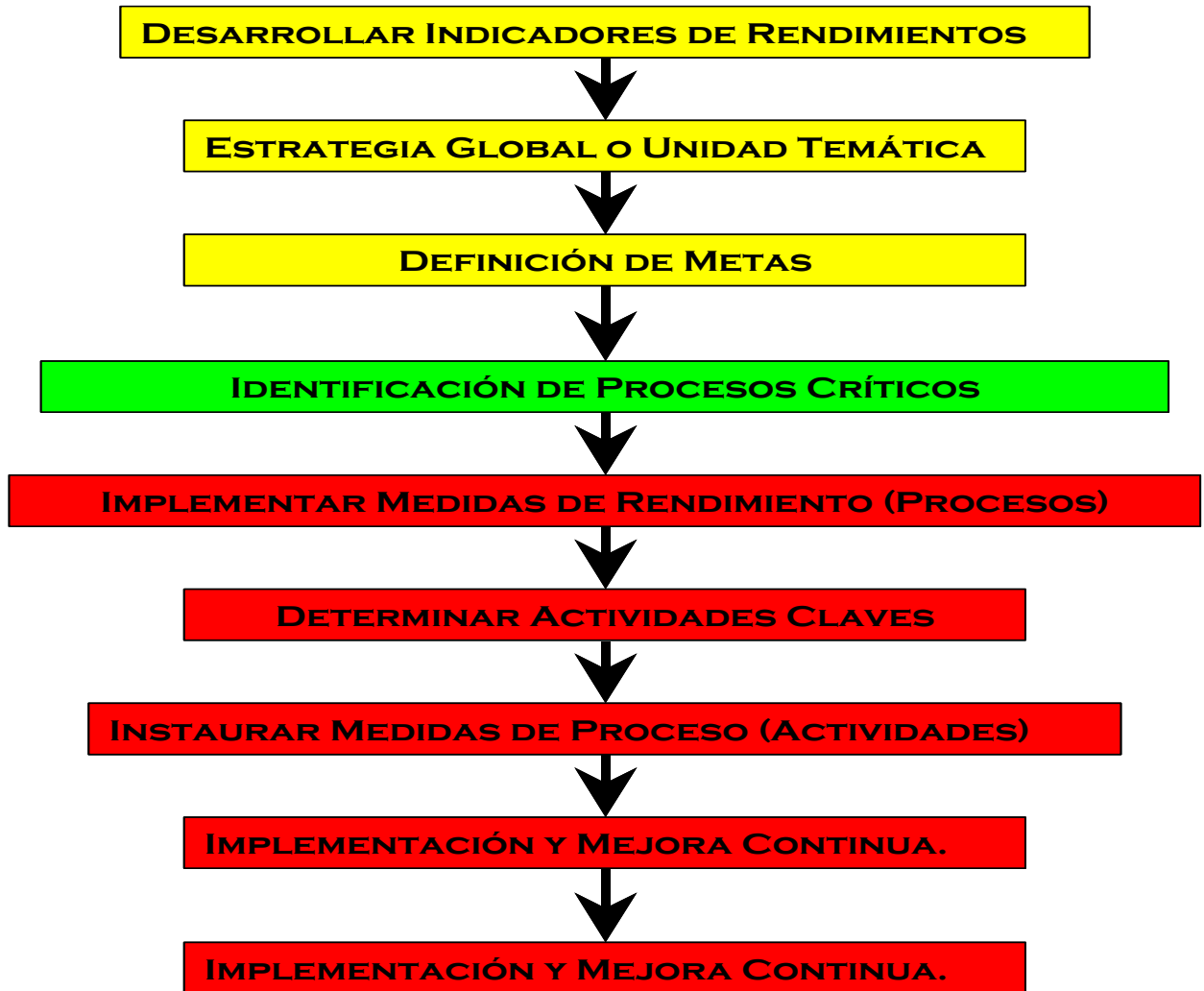
rendimiento mientras que el grupo de mantenimiento estratégico realiza una constante retroalimentación que ayudará al proceso a mejorar para una adecuada y rápida implementación.

Las empresas se mejoran a través de sus actividades, se controlan a través de sus procesos, se evalúan y compararan con otras a través de sus macroprocesos. (Beer & Eisenstat, 1990)

**Parágrafo 4 de Elemento 3 del Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 - Mejora continua**

La mejora continua reúne todos los pasos anteriores buscando maximizar la eficiencia de todo el sistema productivo y evitando las pérdidas en todas las operaciones. Para ello se necesita una revisión permanente de todas las actividades clave, los procesos críticos, las metas y las estrategias.

El campo estratégico está compuesto por las metodologías que se desarrollan con el fin de evaluar el grado de éxito alcanzado con las tácticas desarrolladas; esto implica el establecimiento de índices, rendimientos e indicadores que permitan medir el caso particular con otros de diferentes industrias locales, nacionales o internacionales. Es la guía que permite alcanzar el estado de éxito propuesto y deseado. Se alcanza mediante el LCC, el CMD, los costos, la Terotecnología, etc. (Gery, 1991)



*Figura 19 - Orden de ideas para la aplicación de conceptos*

*Elemento 4 del Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 - Matriz resumen del Quantum*

*Performance*

La medición del *Quantum Performance* se realiza en tres niveles. El tercer nivel lo componen las personas, las cuales realizan las actividades que se miden con índices de rendimiento. El segundo nivel es el proceso donde se encuentran integradas las personas y los recursos necesarios para generar productos o servicios a los clientes. El primer nivel es toda la

organización en donde los costos son la medida de rendimiento financiero que mide el lado económico de la bondad, dinero invertido en personas, proceso y organización. (Kaplan & Norton, 1997)

El método del Q.P desarrolla medidas globales, resultados y rendimiento basados en costo, calidad y tiempo, permitiendo optimizar el nivel de servicio y el valor agregado. Este modelo es aplicable a cualquier área, división, departamento, entidad o empresa.

CATEGORÍAS			
	Costos.	Calidad.	Tiempo.
<b>Nivel 1: Organización</b>	Financiero Operativo Estratégico	Empatía. Productividad. Confianza. Credibilidad. Competencia.	Velocidad Flexibilidad. Elasticidad. Involucrarse.
<b>Nivel 2: Proceso.</b>	Entradas. Inputs. Actividades.	Adaptabilidad Productividad	Velocidad. Flexibilidad.
<b>Nivel 3: Personas.</b>	Compensación Desarrollo Formación Motivación.	Confiabilidad. Credibilidad. Aptitud Competencia	Involucrarse. Compromiso. Flexibilidad.
	Costos.	Calidad.	Tiempo.
CATEGORÍAS			

*Figura 20 - Matriz de medición del Q.P*

El mantenimiento y la producción dentro de la industria son áreas independientes, unidas por las máquinas, las cuales son los recursos que operan las personas en cada proceso productivo, llevando al objetivo general de la organización. Este método es requerido dentro de

la confiabilidad aplicada a procesos productivos, ya que ayuda al monitoreo de las actividades realizadas por las personas que son evaluadas por medidas rendimiento. La metodología permite equilibrar las diversas medidas de costo, tiempo y calidad a través de todos los niveles de la organización, procesos y personas. (Hronec S. M., 1995)

***Elemento 5 del Artículo 2 del Aparte 3 Sección 2 – Efectividad del proceso***

El desempeño y funcionamiento de un proceso se miden a través de indicadores de eficiencia, eficacia y efectividad, los cuales deben proporcionar a los tomadores de decisiones detectar las oportunidades de mejora.

La efectividad es el resultado del proceso para alcanzar los objetivos propuestos y la utilización óptima de los recursos para lograrlo. Por lo tanto, son el resultado de la eficacia y la eficiencia (Domínguez, 1999) (Hronec, 1995) (Kaplan & Norton, 1997) .

La efectividad se desarrolla en términos de indicadores de mantenimiento y producción que son tenidos en cuenta para satisfacer las necesidades del proceso.

***Ecuación 11 - Ecuación de efectividad***

<b>Fórmula Magna Suprema Máxima v Única de Mantenimiento</b>	
Efectividad de la máquina o elemento=	<i>Confiabilidad * Mantenibilidad * Disponibilidad * Capacidad utilizada</i>
Efectividad del sistema=	$\frac{\text{Efectividad de la Máquina o de elemento}}{LCC} = \frac{C * M * D * K}{LCC}$
<i>donde LCC=Life Cycle Cost y K = Capacidad utilizada</i>	

Fuente: (Barringer@ H. P., 2005)

Es en la Terotecología<sup>13</sup> donde se apoya el concepto del costo económico integral del ciclo de vida *LCC* y a partir de allí donde se establecen los indicadores magnos de mantenimiento: efectividad, *LCC* y *CMD* (Evans, 1975).

*Ecuación 12 - Ecuación del ciclo de vida*

$$LCC = \sum_0^T \frac{1}{(1+r)^n} * C(n)$$

Donde *r* es la tasa de descuento o rata de interés

*C* (*n*) es el costo en el año *n*.

*T* es la vida útil en años

---

<sup>13</sup> A través de ella se logran integrar todos los niveles del mantenimiento junto con sus elementos estructurales y sus relaciones gobernadas por las leyes del *CMD*.

#### **Aparte 4 - Sección 2 - Conclusiones capítulo 2**

Mantenimiento es el cliente de producción y a través de la identificación de los procesos críticos que tiene una línea de proceso, se pueden empezar a hacer mejores por medio de la implementación de estrategias de mantenimiento que con el pasar de los años, se han venido puliendo y mejorando cada vez más para llevar a los procesos productivos a un nivel de confiabilidad muy alto.

Todos los pasos por seguir dentro de las medidas de rendimiento y la metodología del Quantum Performance son importantes para la consecución de un plan de mejora que tiene las bases en cambios culturales, mentales y logísticos dentro de cualquier proceso productivo ya que, las medidas de rendimiento no tendrán peso y relevancia, si no se toman los correctos planes de implementación de mejora.

Lo que no se mide no se controla, pero no se puede medir con microscopio lo que se va a cortar con un hacha. Por lo tanto, se debe delegar un equipo de trabajo, un grupo de ingenieros con la capacitación necesaria para implementar la logística que requiere la implementación de estrategias típicas del mantenimiento aplicado a la confiabilidad de procesos productivos, y así, evitar la parálisis por análisis, saber qué se debe medir, no perder el tiempo midiendo procesos que dan poco valor a la compañía y, sobre todo, reducir costos implementando metodologías como el CMD.

### **Sección 3 - Metodología confiabilidad**

#### **Aparte 1 - Sección 3 - Objetivo número 3**

TRES - Aplicar - Aplicar a procesos productivos, la medición de confiabilidad por los métodos de mantenimiento y producción para lograr su optimización.

#### **Aparte 2 - Sección 3 - Introducción capítulo 3**

La sección presenta la aplicabilidad de los cálculos de confiabilidad en procesos productivos, teniendo en cuenta que esta medida, a pesar de ser implementada por el área de mantenimiento, es importante para un mejor control sobre sistemas críticos en donde la relación máquina y producción está unida y sostenida por la confiabilidad.

La mayoría de las tácticas conocidas como *TPM*, *RCM*, proactiva, reactiva, clase mundial, *PMO*, *RCM Scorecard*, centrada en objetivos, basada en riesgos, terotecnológica, etc., fundamentan su establecimiento a partir de los indicadores CMD; los cuales proveen los principios básicos estadísticos y proyectivos del mantenimiento. Sin embargo, la mejor forma de controlar el mantenimiento y sus implicaciones en producción es a través del componente confiabilidad y parámetros asociados (Barringer@ H. P., Life Cycle Cost Issues, 2005).

La confiabilidad en un proceso puede ser analizada con los datos de salida de producción y es útil para encontrar patrones de pérdida y controlar los costos de producción del proceso, para esto se puede utilizar la confiabilidad de proceso utilizando Weibull.

La técnica de Weibull ha ayudado a definir un curso de acción estratégico basado en la cuantificación de la confiabilidad del proceso. Esta herramienta, cuando se agrega a su arsenal de

mejora de confiabilidad, ayudará a cualquier empresa a optimizar la disponibilidad de sus productos para sus clientes y maximizar los beneficios para sus grupos de interés (Barringer P. H., 2000).

### **Aparte 3 - Sección 3 - Desarrollo de capítulo 3**

Los cálculos y gráficas expuestos en esta sección están basados en el sistema integrado de gestión CMD y las aplicaciones de confiabilidad por métodos de Weibull. Se cambia la aplicabilidad de este método que era netamente del área de mantenimiento y se entregan mejoras de procedimientos para una mejor consecución de resultados para el área de producción.

#### **Artículo 1 del Aparte 3 Sección 3 - Introducción a Weibull**

La mayoría de los problemas de confiabilidad tienen demasiada información y muy poco conocimiento. Las plantas de proceso tienen grandes cantidades de datos relacionados con el equipo y las condiciones de operación. El problema es tratar de hacer que los datos hablen sobre la fiabilidad en términos que sean comprensibles para la persona común. Un método simple es usar la salida de producción diaria del proceso y dejar que los datos de producción "hablen".

Cada proceso de producción tiene datos de producción diaria generalmente organizados y estudiados en secuencia temporal. Pocas organizaciones ven los datos como salida de una "caja negra" para estudiar los resultados en formato estadístico para ver patrones en los datos. El análisis de Weibull es una forma de organizar los datos de la planta (Abernethy, 2006).

Los diagramas de Weibull, la herramienta de elección para la mayoría de los problemas de confiabilidad se usará en este documento de una manera no tradicional. Las gráficas de Weibull

definirán la confiabilidad de los procesos y calcularán las pérdidas por fallas en el proceso. Las pérdidas de producción en unidades de producción son un precursor del dinero. Cuando los problemas se explican en dinero y tiempo, todos los entienden (Reliasoft, 2017).

El costo de las fallas de proceso muchas veces excede el costo de las fallas de los equipos individuales en muchos múltiplos. Nos angustiamos por la falla de las bombas y los intercambiadores de calor; estos son los peones de bajo costo, y de lo que deberíamos preocuparnos son costosas fallas de proceso: el mayor precio.

El problema es decidir si existe un problema de confiabilidad con el equipo o un problema con el proceso de producción. Los diagramas de Weibull ayudan a explicar y categorizar los problemas en un formato visual comprensible para ingenieros, propietarios de procesos y administración (Barringer P. H., 2000).

### **Artículo 2 del Aparte 3 Sección 3 - Ventajas de usar Weibull en procesos productivos**

Lo importante de la técnica es que muestra en una sola grafica de Weibull los datos más significativos, y se puede leer en ella la historia del proceso, esto es de gran importancia para decisiones a nivel alto de la organización. El análisis de confiabilidad de proceso de Weibull es práctico, se enfoca en resolver problemas de forma rápida y es útil para definir un camino de acción estratégico para obtener mejoras significativas.

Una de las ventajas del análisis de Weibull es la capacidad de proporcionar análisis de falla y pronósticos de falla razonablemente precisos con muestras extremadamente pequeñas. Las soluciones son posibles en las primeras indicaciones de un problema sin tener que "bloquear

algunos más". Pequeñas muestras también permiten pruebas de componentes rentables. Por ejemplo, las pruebas de Weibull de "muerte súbita" se completan cuando se produce el primer fallo en cada grupo de componentes (por ejemplo, grupos de cuatro rodamientos). Si todos los rodamientos se someten a pruebas de falla, el costo y el tiempo requeridos son mucho mayores (Barringer@ H. P., Life Cycle Cost Issues, 2005).

Otra ventaja del análisis de Weibull es que proporciona una gráfica simple y útil de los datos de fallas. La gráfica de datos es extremadamente importante para el ingeniero y para el gerente. El gráfico de datos de Weibull es particularmente informativo, como señaló Weibull en su artículo de 1951.

### **Artículo 3 del Aparte 3 Sección 3 - Gráfica de Weibull aplicada al proceso productivo**

Las gráficas Weibull tradicionales utilizan datos de edad a falla obtenidos a partir de fallas de componentes para hacer gráficas en línea recta. Para los componentes, la pendiente de la línea Weibull indica el modo de falla para el componente. Esta es una característica importante para permitir que los datos "hablen" sobre qué parte de la curva de la bañera está mejor representada, es decir, la mortalidad infantil, las fallas fortuitas o el desgaste de la vejez.

Los procesos de clase mundial muestran un  $\beta$  (beta) igual a 1,00 lo que representa una muy pequeña variación en la producción. La comparación del factor de forma de varios procesos permite eliminar la subjetividad y se hace de forma fácil (Barringer@, 2008).

Una de las ventajas significativas que posee la distribución Weibull es que es muy manejable y se acomoda a las tres zonas (infancia o rodaje, madurez o vida útil y

envejecimiento) de la curva de la bañera o de Davies. La distribución de Weibull posee en su forma general tres parámetros, lo que le da una gran flexibilidad y cuya selección y ajuste adecuado permite obtener mejores ajustes, que con otras distribuciones (Rojas, 1975).

El análisis Weibull tradicional separa cuidadosamente diferentes modos de falla para obtener datos limpios con suspensiones (es decir, los datos están censurados) por lo que solo se representan modos únicos de falla en cada diagrama de Weibull en línea recta. Cuando los modos de falla mixtos se trazan en un diagrama de Weibull, a menudo aparecen cúspides que dan pistas sobre los cambios y brindan evidencia de modos de falla mixtos. Las técnicas de confiabilidad aprovecharán las cúspides para proporcionar información sobre la confiabilidad del proceso (Barringer P. H., Process Reliability Concepts, 2000).

La escala horizontal es una medida de la vida o el envejecimiento. Los ciclos de inicio / parada, kilometraje, tiempo de operación, aterrizajes o ciclos de misión son ejemplos de parámetros de envejecimiento. La escala vertical es el porcentaje acumulado fallido. Los dos parámetros que definen la línea de Weibull son la pendiente, beta y la vida característica, eta. La pendiente de la línea,  $\beta$ , es particularmente significativa y puede proporcionar una pista a la física de la falla o de la condición del proceso. La vida característica,  $\eta$ , es el tiempo típico de falla en el análisis de Weibull. Se relaciona con el tiempo medio hasta el fracaso (Abernethy, 2006).

***Elemento 1 del Artículo 3 del Aparte 3 Sección 3 – Fundamentos de la distribución Weibull***

Para poder usar la parametrización a través del papel Weibull, se debe tener en cuenta que es necesario alinear los valores que representan la cantidad de fallas dentro de un proceso productivo, ya que éstos influyen en el cálculo de la confiabilidad de éste. También se debe tener en cuenta que los esfuerzos para el análisis de confiabilidad se deben enfocar en las líneas de proceso que representan un lucro cesante considerable en caso de presentar una avería afectando la confiabilidad y la producción del macro proceso.

Los datos de producción de un proceso en general se adquieren diariamente. Si se hiciera un resumen de datos semanal o mensual, se perdería la confiabilidad del proceso. La producción diaria refleja las condiciones de UpTime y DownTime bajo las mediciones. La producción diaria es un valor escalar.

Los estadísticos han elaborado un esquema para manejar la conversión de resultados escalares en un sistema de coordenadas X-Y. Los datos se clasifican de menor a mayor para formar N fragmentos de información. El rango de cada valor se identifica con su posición "i" para usar con la ecuación de rango de medianas de Bernard, que da la posición Y de confiabilidad como  $1 - (i - 0.3) / (N + 0.4)$ .

Para una columna de rango de datos de producción con  $N = 365$  para 365 días de producción, supongamos que el décimo punto de datos ( $i = 10$ ) fue 703. El valor X es 703, y el valor Y de confiabilidad es  $1 - (10 - 0.3) / (365 + 0.4) = 1 - 9.7 / 365.4 = 100\% - 2.65753\% = 97.34247\%$  para una posición cartesiana (703,97.34247%) en el papel de probabilidad de Weibull.

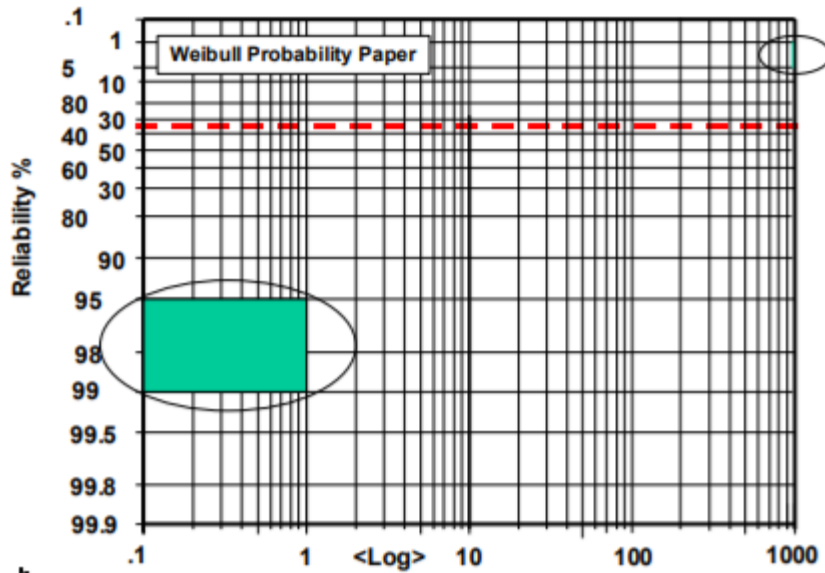


Figura 21 - Papel de Weibull para producción

Fuente (Barringer P. H., Process Reliability Concepts, 2000).

La figura muestra el gráfico de probabilidad de Weibull en el papel. El eje X es una escala logarítmica y se usará para trazar la producción diaria desde una unidad de producción. El eje Y es una división irregular en una escala de confiabilidad tomada de un logaritmo de otro logaritmo.

El eje Y se traza en una escala de confiabilidad en lugar de la escala acumulativa tradicional que refleja la no confiabilidad. Observe que las escalas de diagrama de Weibull aumentan los problemas en la esquina inferior izquierda para que puedan observarse fácilmente como se muestra en las áreas rectangulares oscurecidas resaltadas por las elipses en la figura. Ambas elipses son 4% \* 0.9 unidades de producción.

La gráfica esta independiente del tiempo, lo que hace que el proceso sea tratado como una caja negra, por consiguiente, los modos de falla de Weibull no aplican. Por lo que los parámetros tienen un significado distinto.

El parámetro Beta, ( $\beta$ ) no tiene relación física con la mortalidad infantil, funcionamiento o deterioro presentados en los análisis conocidos de Weibull. Pero si tiene relación física con el proceso graficado. En este caso representa el grado del proceso, un bajo valor indica un proceso pobre o de bajo grado o poco control y con gran variación en la salida, mientras que un valor alto muestra un proceso controlado y de alto grado.

El parámetro Eta ( $\eta$ ), el cual ocurre cuando la confiabilidad es 36,8% reduce la no linealidad del proceso llevando la producción diaria a un solo valor de producción diaria. Los procesos con alto Eta ( $\eta$ ) son deseados, estos valores determinan el tamaño físico de la fábrica y como es manejada (Barringer@, y otros, 2002).

### ***Elemento 2 del Artículo 3 del Aparte 3 Sección 3 – Identificación de procesos según la gráfica Weibull***

Los procesos se pueden determinar dependiendo de la gráfica que se obtiene de Weibull, de acuerdo con los datos de producción y las alineaciones que se hacen con las funciones. La grafica de los procesos sin problemas de confiabilidad muestra un patrón de línea recta al ser graficado en Weibull. En la siguiente gráfica de Weibull, ninguna de las curvas tiene problemas de confiabilidad, es decir, una cúspide. La línea de tendencia A es el mejor proceso de su clase, con una pequeña variación en la producción, mientras que la línea de tendencia B, presenta mayor variación.

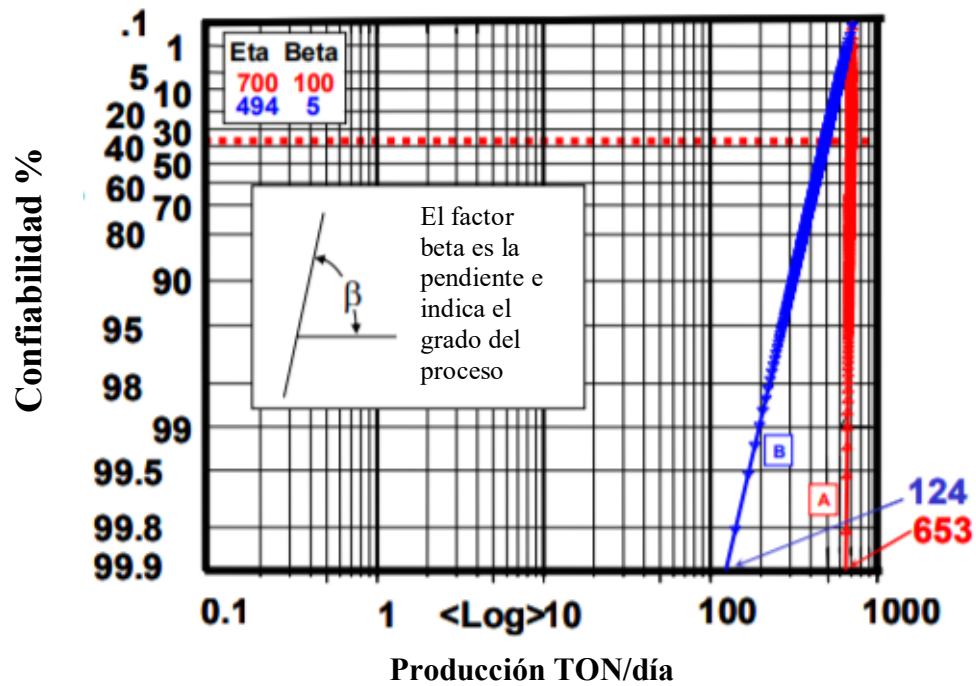


Figura 22- Weibull sin problemas de producción

Fuente: (Barringer@ H. P., Life Cycle Cost Issues, 2005)

Uno de los procesos tiene un beta de 100 (proceso A, rojo en la ilustración) y el otro un beta de 5. Los procesos considerados de clase mundial en cuanto al control de su producción son los que muestra un Beta ( $\beta$ ), mayor a 100, muy pocos procesos tienen valores cercanos a 200. La pendiente Beta ( $\beta$ ), y la localización de la producción nominal se deben al diseño del proceso y cómo esté operado (Barringer@, y otros, 2002).

Tabla 3- Tipos de control de proceso

Control del proceso	Valor de Beta $\beta$
Malo	5
Justo	10
Ajustado	25
Excelente	50
Clase mundial	100
Raramente alcanzado	200

En la siguiente figura se muestran los procesos con fallos de fiabilidad. La primera cúspide en la esquina superior derecha de la gráfica en la línea de tendencia de Weibull define un punto de falla (es decir, la línea de tendencia cambia a una mayor variabilidad). La cúspide más alta en la esquina superior derecha generalmente identifica la confiabilidad del proceso.

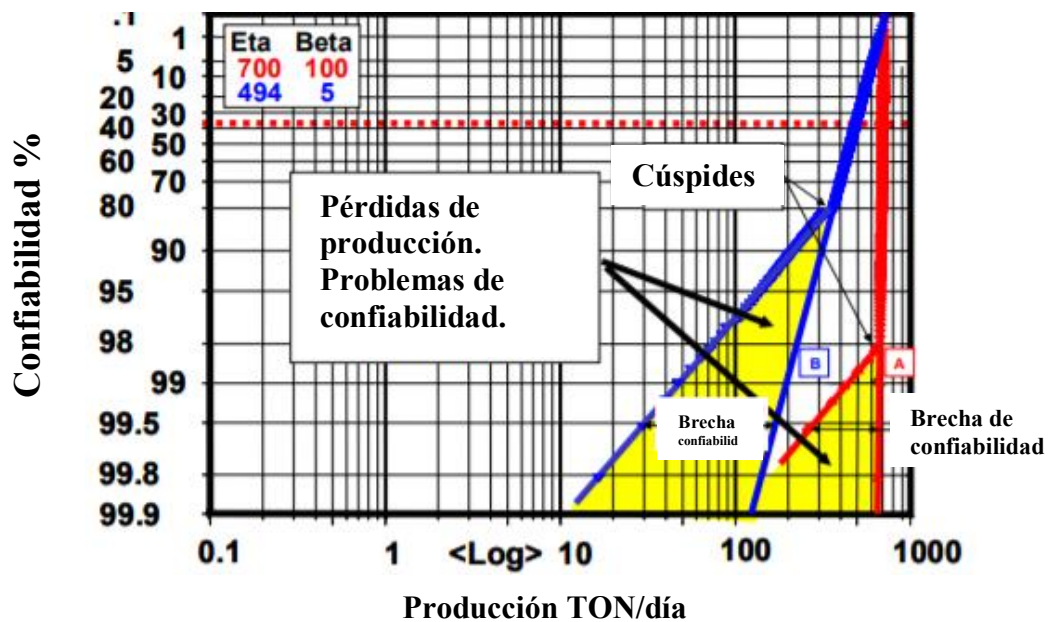


Figura 23- Weibull con problemas de producción

Fuente: (Barringer@ H. P., Life Cycle Cost Issues, 2005)

Las cúspides en la figura muestran problemas de confiabilidad. La cúspide de la línea A con una confiabilidad del 98% es mejor que la cúspide de la línea B con una confiabilidad del 80%. Las cúspides definen la confiabilidad del proceso donde comienza una dispersión más grande en la salida.

Las brechas a menudo se caracterizan como fábricas ocultas: una fábrica oculta tiene el costo de la fábrica real, pero la fábrica oculta genera residuos y, por lo tanto, reduce la producción. Los procesos muestran dispersión de los datos cuando se presentan las cúspides, por lo tanto, la confiabilidad del proceso se mide en estos puntos (Barringer@, y otros, 2002).

***Elemento 3 del Artículo 3 del Aparte 3 Sección 3 - Capacidad,  
productividad y pérdidas leídas desde el gráfico Weibull***

Un tema importante para juzgar qué tan bien funciona un proceso es definir una capacidad nominal de identificación; es la capacidad de producción máxima en condiciones de operación y control ideales. El contratista del sitio que diseña y construye la fábrica generalmente proporciona la capacidad nominal.

Algunas organizaciones miden sus mejores resultados en un período de tiempo contiguo, como los mejores 5 días, los mejores 10 días, etc., según un único valor para caracterizar la mejor clasificación de la capacidad nominal, lo que establece el rendimiento de producción demostrado que se encuentra a la izquierda de la línea de capacidad nominal. Las comparaciones entre los resultados reales de la planta y el análisis de Weibull muestran que la capacidad nominal tiene un valor característico mayor que la obtenida típicamente por los valores de producción demostrados (Barringer@ P. H., Summary of Process Reliability, 2008).

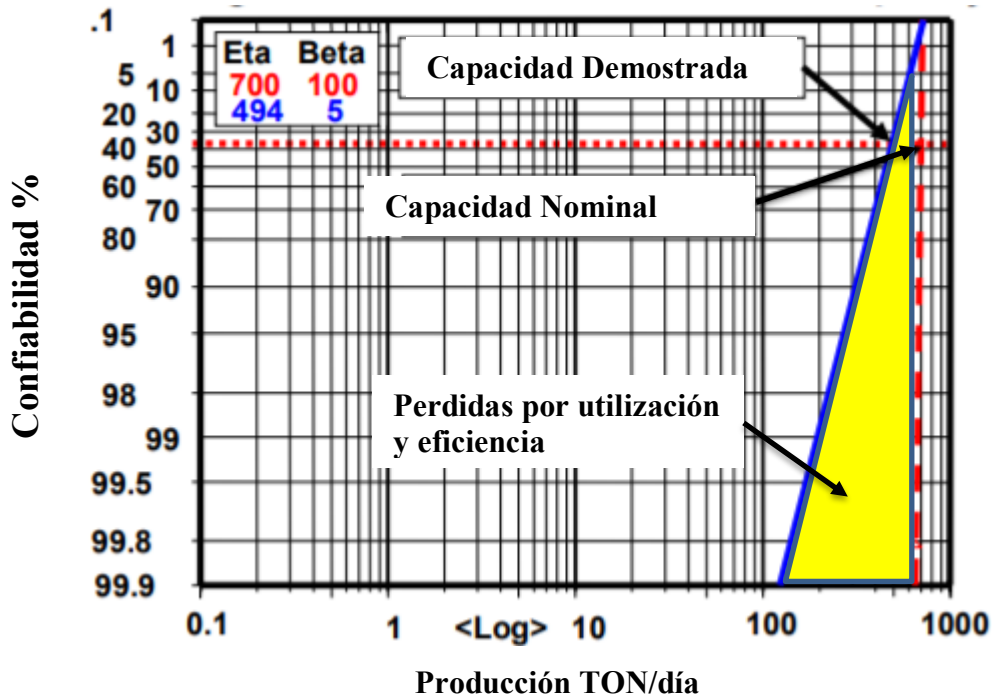


Figura 24- Capacidad y pérdidas de producción

El área en forma de cuña que está entre la línea demostrada y la línea nominal representa la brecha de producción relacionada con pérdida de eficiencia y pérdidas en la utilización. Las pérdidas de eficiencia se relacionan con problemas de salida / entrada. Por ejemplo, suponga que un proceso (sin errores ni desperdicios) podría generar 1000 lbs / h como estándar. Lo que se obtiene del proceso es de 750 lbs / h debido a la fábrica oculta, entonces la eficiencia es de  $750/1000 = 75\%$ . Esta es la relación de entrada / salida como si ganara 0.75 horas de trabajo mientras pasa 1.0 hora (Barringer@ H. P., Life Cycle Cost Issues, 2005).

Las pérdidas de utilización se relacionan con problemas de pérdida de tiempo. Por lo general, tiene dos cubos grandes para cargar el tiempo de fabricación: 1) mano de obra directa

para hacer el producto (TD<sup>14</sup>) y 2) mano de obra desperdiciada no imputable contra el producto o su valor de inventario, y esto se llama pérdida de mano de obra (TP<sup>15</sup>). La utilización se puede calcular como:  $TD/(TD+TP)$

*Ecuación 13- Productividad*

$$Productividad = Eficiencia * Utilización de Máquina o sistema$$

Por ejemplo para un turno de 8 horas, si el trabajo directo fue de 4 horas, entonces el tiempo no asignado al producto es 4 horas, luego la utilizations de  $(4/8)= 50\%$ .

Para el ejemplo mencionado.  $Productividad = 0.75 * 0.50 = 37.5\%$ .

En la Figura 24 se muestra una planta oculta, un proceso de un año donde las brechas de eficiencia y utilización contienen 88,490 toneladas de producción no realizada. La brecha (una suma de la distancia horizontal desde la línea demostrada a la línea de la placa de identificación) es igual a  $88,490 / 494 = 179$  días a la capacidad demostrada o  $88,490 / 700 = 126$  días a la capacidad nominal (Barringer@ H. P., Life Cycle Cost Issues, 2005).

---

<sup>14</sup> Trabajo Directo

<sup>15</sup> Trabajo Perdido

Se debe tener en cuenta que la pendiente y la ubicación de la capacidad nominal se fijan por la forma en que se diseña el proceso y cómo se opera: ambos problemas están bajo el control de la administración.

La figura 24 muestra también la producción diaria con una línea de tendencia recta sin problemas de confiabilidad. La ausencia de cúspides en la línea demostrada deja una impresión de que el proceso no necesita trabajo. Sin embargo, cuando se agrega la línea de la capacidad nominal, aparece una enorme brecha de pérdidas. La mayoría de los procesos reales tienen tanto pérdidas de fiabilidad más pérdidas de eficiencia como de utilización.

Resolver problemas de confiabilidad requiere herramientas diferentes que resolver problemas de eficiencia y utilización. La figura muestra los datos de producción de un proceso simple con un problema. Por lo tanto, no es lo mismo tener problemas de confiabilidad en el proceso productivo como tal, sino tener problemas con la eficiencia y la utilización que vienen arraigados por un defecto más humano que de las máquinas como tal.

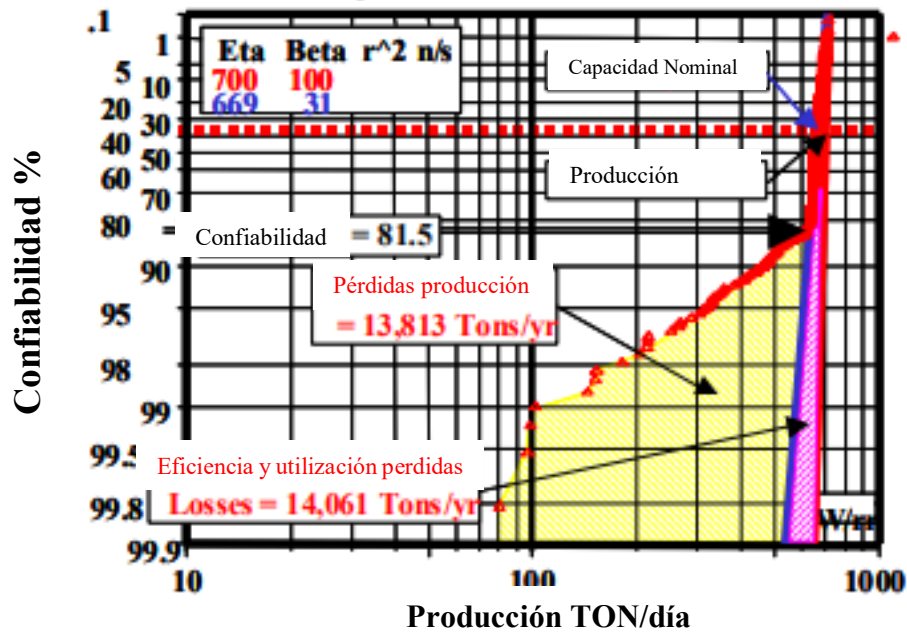


Figura 25- Problema simple con problemas de confiabilidad

La Figura 25 muestra los datos de producción de un proceso simple con un problema. El proceso ha demostrado una confiabilidad del 81.5%. Las pérdidas de confiabilidad debajo de la cúspide son de 13,813 toneladas por año, como lo muestra la zona sombreada a la izquierda de la línea demostrada. La figura también muestra que el problema principal es un problema de producción seguido por un problema de confiabilidad (Barringer@ P. H., Summary of Process Reliability, 2008).

Si la capacidad demostrada se ve muy cerca de la línea de capacidad nominal, todos los problemas se ven como un problema de confiabilidad. De hecho, para la situación en la figura anterior, el problema principal se debe a la eficiencia y la utilización que está directamente controlada por la administración o el planeador de producción y mantenimiento.

### **Artículo 3 del Aparte 3 Sección 3 - Gráfica de Weibull en análisis de confiabilidad para mantenimiento**

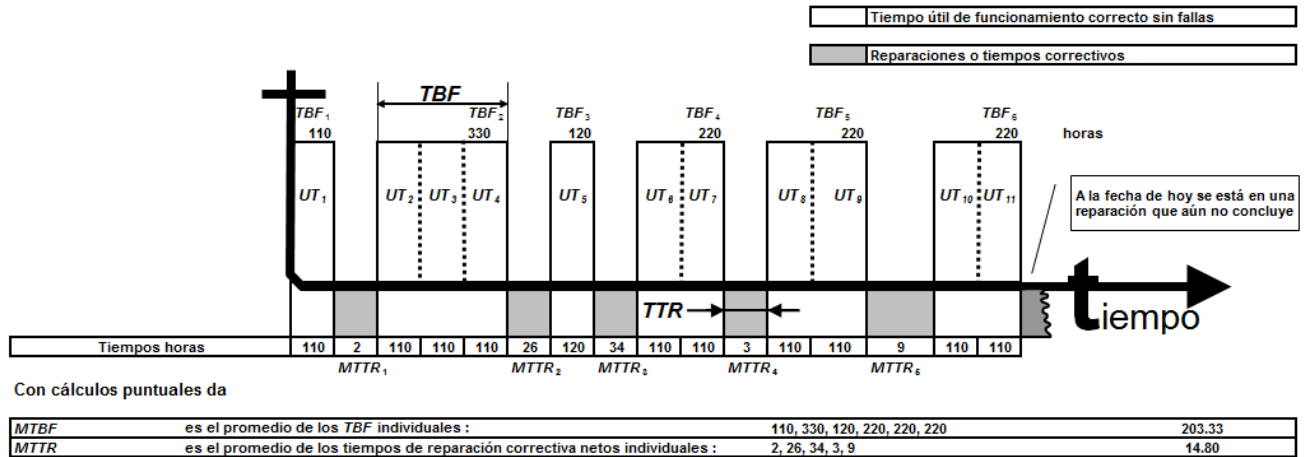
La explicación que hace el Doctor Mora en su libro “*Mantenimiento Industrial Efectivo*”, sobre los pasos para la lectura de indicadores de Weibull por medio de alineaciones, es la mejor explicación que un educador pudo haber realizado sobre el tema. Aquí tomo el ejemplo que se utilizó para la correcta explicación del concepto.

El procedimiento consiste en graficar los valores de  $F(t)$  o de  $M(t)$  en el eje Y, con sus respectivos tiempos  $t$  en el eje X. La forma que posee el papel Weibull permite conformar una línea recta, a partir de la cual se logra valorar tanto la pendiente como la intersección de la misma con el eje Y vertical; y a partir de estos dos valores, se pueden obtener los parámetros propios de la función Weibull de  $\beta$ eta, Eta, etc (Mora, Mantenimiento, 2014).

Para determinar los parámetros  $\beta$  y  $\eta$  se utiliza el papel de Weibull, así.  $\beta$ eta es el parámetro de forma y representa la pendiente de la recta. Para obtener el valor de  $\beta$ eta se traza una recta paralela a la obtenida con la representación de  $t$  y  $F(t)$  que pase por la coordenada donde  $F(t)$  acumulado de fallas valga 63.2 en la ordenada y  $\ln(t)$  igual 1 en la abscisa; de allí se puede leer directamente el valor de  $\beta$  en una escala tabulada de 0 a 7.

El valor de  $\eta$  es el parámetro de escala y su valor viene dado por la intersección de la recta trazada con la línea paralela al eje de abscisas correspondiente al 63,2 % de fallas acumuladas. A efectos de utilizar el método gráfico se toman los datos de un ejemplo que se venía trabajando con disponibilidad inherente en donde se trae en desarrollo, con los  $F(t)$  y  $M(t)$  calculados en el

ejemplo dado en la primera sección de este trabajo, pero convertido con los *UT* no repetidos.



*Figura 26- Ejemplo de tiempos de funcionamiento y no funcionamiento de una máquina*

Para los casos de mantenimiento, se supone una máquina en donde se hace un seguimiento muy estricto de los tiempos de funcionamiento y no funcionamiento de ella. Para los cálculos que se tienen que hacer de mantenimiento, sí se deben de tener en cuenta los tiempos, ya que son la base de todo el conjunto de parámetros que se deben obtener en el proceso de construir la gráfica.

Tabla 4- Cálculos para alineación de Weibull

**Método i-kaésimo**

No. Dato j	Datos de operación sin fallas - Runs Hours =λ - en horas	F(t) = j / N + 1
1	110	14.29%
2	120	28.57%
3	220	42.86%
4	220	57.14%
5	220	71.43%
6	330	85.71%
Media		50.00%

No. Dato j	Datos de reparación en horas	M(t) = j / N + 1
1	2	16.67%
2	3	33.33%
3	9	50.00%
4	26	66.67%
5	34	83.33%
Media		50.00%

**Método i-kaésimo con no repetición de UT**

No. Dato j	Datos de operación sin fallas - Runs Hours =λ - en horas	F(t) = j / N + 1
1	110	14.29%
2	120	28.57%
5	220	71.43%
6	330	85.71%
Media		50.00%

No. Dato j	Datos de reparación en horas	M(t) = j / N + 1
1	2	16.67%
2	3	33.33%
3	9	50.00%
4	26	66.67%
5	34	83.33%
Media		50.00%

El método i-kaésimo explicado en la primera sección del libro, siguiendo los pasos del CMD en donde se deben eliminar los datos repetidos y después calcular los porcentajes del F(t) y el M(t) tal como fueron explicados anteriormente.

Los procedimientos dados por el Doctor Mora en su libro son diferentes a los que realiza el Maestro Barringer en sus documentos, debido a que Barringer es muy gráfico y busca el entendimiento de los conceptos por medio de su programa SuperSmith.

Tabla 5- Resultados del Ejemplo de disponibilidad Inherente para alineación de Weibull

**No Confiabilidad**

$\text{Ln}(\text{Ln}(1/(1-F(t)))) - \text{Y de la regresión}$	$\text{Ln de datos} - \text{X de la regresión}$
-1.86982	4.700
-1.08924	4.787
0.22535	5.394
0.66573	5.799

**Mantenibilidad**

$\text{Ln}(\text{Ln}(1/(1-M(t)))) - \text{Y de la regresión}$	$\text{Ln de datos} - \text{X de la regresión}$
-1.70198	0.693
-0.90272	1.099
-0.36651	2.197
0.09405	3.258
0.58320	3.526

**Cálculos con método de regresión en excel**

<b>Intersección</b>	<b>-11.742</b>
<b>beta</b>	<b>2.171</b>
<b>Eta <math>\eta</math></b>	<b>223.25</b>

<b>Intersección</b>	<b>-1.8708</b>
<b>beta</b>	<b>0.6355</b>
<b>Eta <math>\eta</math></b>	<b>18.98</b>

<b>MTBF</b>	<b>197.711</b>
-------------	----------------

<b>MTTR</b>	<b>26.61</b>
-------------	--------------

**$MTBF = \eta * \text{Gamma } \Gamma (1+ 1/\beta)$**

**$MTTR = \eta * \text{Gamma } \Gamma (1+ 1/\beta)$**

<b>MTBF puntual</b>	<b>203.300</b>
---------------------	----------------

<b>MTTR puntual</b>	<b>14.800</b>
---------------------	---------------

Este método adopta la Función de probabilidades de fallas acumuladas  $F(t)$  la cual trata de alinearla en forma recta, y se vale de la construcción de los ejes de coordenadas Y y X con transformaciones especiales, utilizadas en los papeles de cada función.

Este diseño de los ejes se basa en la alineación de la función de tiempo de falla en la abscisa (X, en este caso eje  $t$ ) y en el eje vertical (Y) la función de no confiabilidad o de probabilidad de falla acumulada, o la de mantenibilidad cuando de esta se trate el análisis (Mora A. L., 2017).

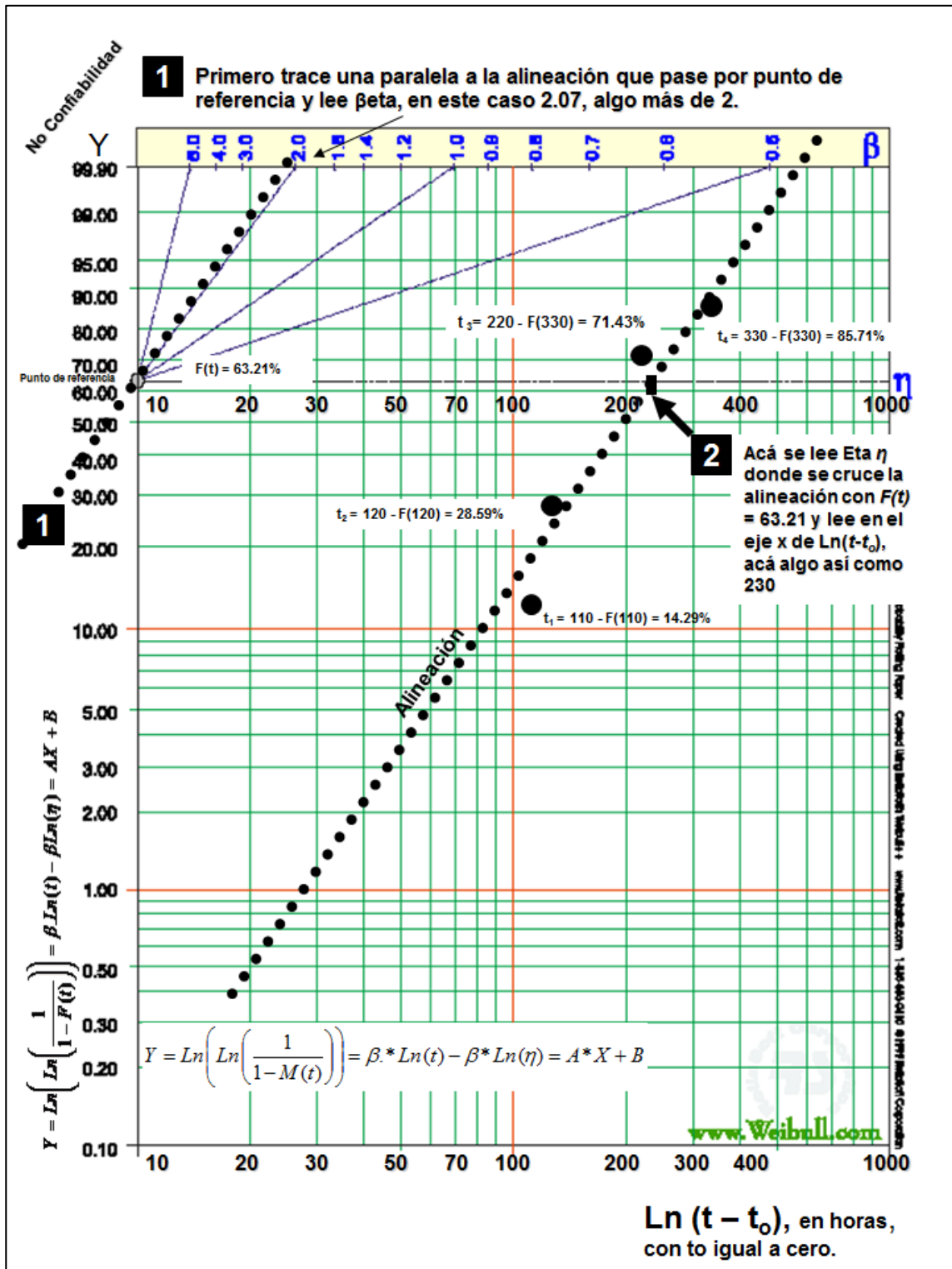


Figura 27- Obtención de parámetros para obtener MTBF por método gráfico

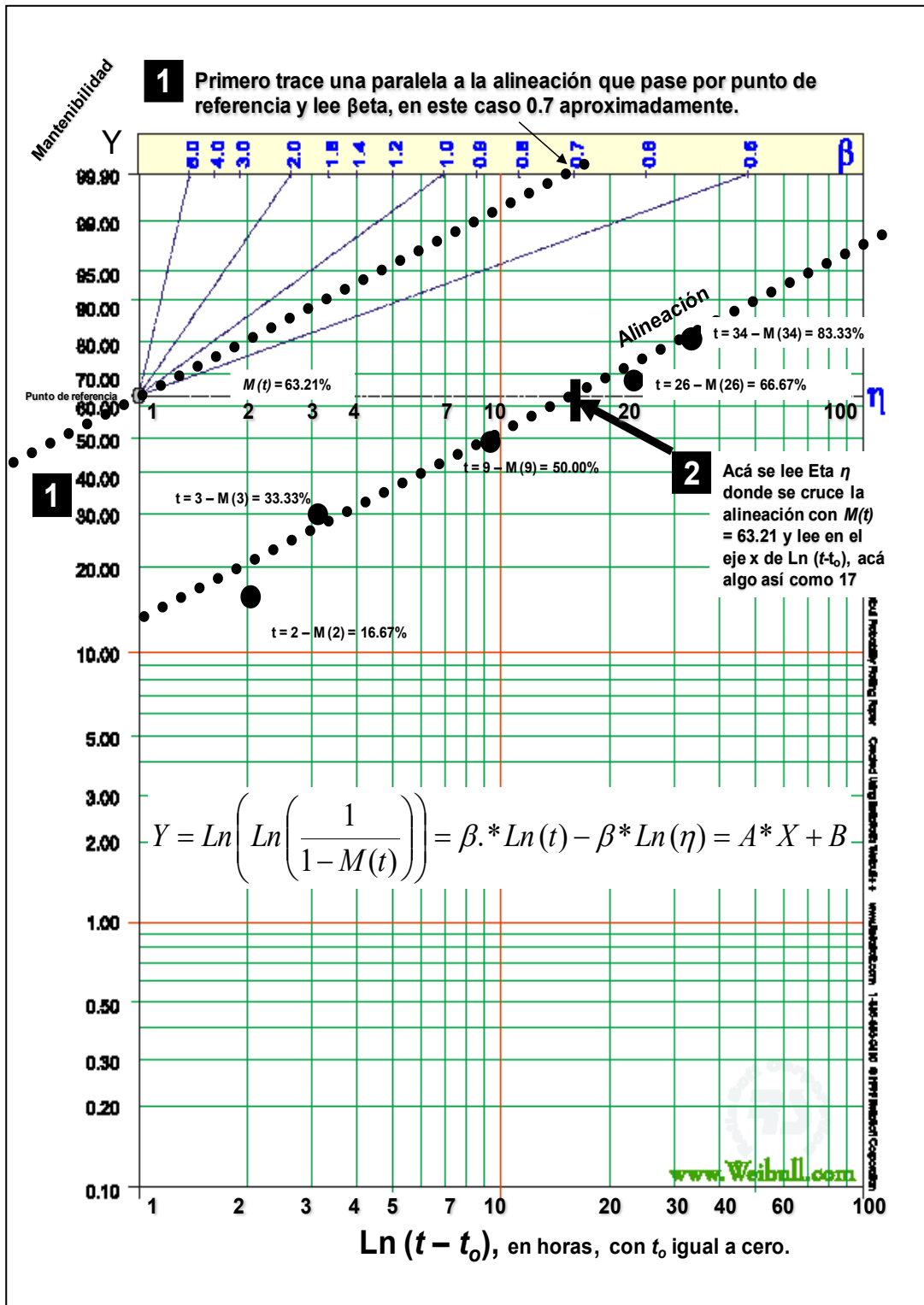


Figura 28- Obtención de parámetros para obtener MTTR por método gráfico

Tabla 6- Resultados de la lectura con el papel de Weibull

**Lectura de Allen - Plait o Papel Weibull**

<b>beta</b>	<b>2.070</b>	<b>beta</b>	<b>0.7000</b>
<b>Eta <math>\eta</math></b>	<b>230.00</b>	<b>Eta <math>\eta</math></b>	<b>17.00</b>
<b>MTBF</b>	<b>203.734</b>	<b>MTTR</b>	<b>21.52</b>

A pesar de que los resultados son similares siempre queda de manifiesto que el método de alineación con el método gráfico en este caso de Weibull, es muy subjetivo, lo que puede conducir a errores importantes en el análisis, en la selección de estrategias y acciones de mantenimiento (Mora A. L., 2017).

**Aparte 4 - Sección 3 - Conclusiones del Capítulo 3**

Cada oportunidad descrita en esta sección puede tener problemas de confiabilidad y producción derivados del diseño, fabricación, selección de equipos / procesos, instalación, operación, mantenimiento, monitoreo, reparación de equipos / procesos y operación del equipo / proceso, en un ambiente específico durante un intervalo especificado de tiempo.

Lo que está en juego no es la perfección idealista, sino las soluciones comerciales estrictamente pragmáticas: considerando las complejidades de las plantas que operan en la vida real, las cuales deben funcionar para ganar dinero. Es fácil perder dinero y es difícil ganar dinero; se deben considerar las dificultades de las condiciones exteriores del mercado y las condiciones interiores de la cultura de la planta.

Nunca se encontrará una planta o una operación sin problemas, todas tienen situaciones donde los problemas deben ser identificados y corregidos atacando las raíces del problema.

El análisis de Weibull de los datos de producción se examina para mostrar cómo adjuntar problemas típicos. Hay que recordar que por razones de competencia no se divulgan los recursos reales, sino que los detalles son genéricos.

La característica interesante de atacar los problemas de confiabilidad en procesos es que la mayoría se puede corregir mediante el trabajo en equipo, y la identificación / cuantificación de problemas de producción y confiabilidad evitando el típico señalamiento y lanzamiento de rocas que ocurre en la mayoría de las plantas entre departamentos. En conclusión, la cuantificación y clasificación correcta de los problemas muestra suficiente "culpa" como para que ninguno de los dos bandos sea inocente. Surgiendo una situación clara de que la producción, la ingeniería y el mantenimiento deben trabajar juntos para su bien común: eliminar las pérdidas.

## **Sección 4 - Táctica**

### **Aparte 1 - Sección 4 - Objetivo 4**

Cuatro - Analizar. Establecer planes de mejora a los procesos productivos a partir de los resultados de confiabilidad mediante la evaluación de Weibull.

### **Aparte 2 - Sección 4 - Introducción capítulo 4**

La táctica de confiabilidad que se explica en la sección a continuación se pudo extraer de los textos leídos, las fórmulas y procedimientos propuestos por dos autores que dieron su parte del conocimiento usando una de las más importantes distribuciones estadísticas aplicadas a procesos productivos. Cada autor dio un aporte a la confiabilidad de un proceso, desde focos diferentes, pero la idea es la detección de problemas de confiabilidad por medio de indicadores y gráficas.

El autor, parte de los ejercicios usados y muestra los resultados que se obtuvieron de la aplicación de conceptos en la sección anterior y, posteriormente sugiere una táctica para que los resultados y explicaciones dadas por Barringer, sean entendidas por medio de las funciones dadas en libro escrito por el Doctor Mora.

### **Aparte 3 - Sección 4 - Desarrollo**

Las situaciones propuestas para producción son simplemente gráficas en donde se pueden leer ciertos resultados dependiendo de un Software que permita graficar tantos datos en el papel de Weibull. A continuación, se analizan los resultados que obtuvo el Maestro Barringer y se dan algunas tácticas por parte del autor para hacer cálculos con funciones y entender la base de los conocimientos propuestos para procesos productivos.

### **Artículo 1 del Aparte 4 - Sección 4 - Resultados del ejemplo de Barringer**

La situación en la Figura 25 muestra una fábrica oculta que ha consumido 42 días de producción real que podría haber sido producida y vendida en beneficio de los accionistas. A menudo, cuando se recuperan estas pérdidas, pueden duplicar los rendimientos de los activos para los inversores.

Para cada problema mencionado anteriormente, se debe identificar y corregir una razón para la deficiencia. Debe hacer un cambio para obtener un cambio. Los autores han observado colectivamente cientos de procesos y el número de ellos que requieren mejoras exceden el 99% (Barringer@ H. P., Life Cycle Cost Issues, 2005).

### ***Elemento 1 del Artículo 1 del Aparte 4 Sección 4 - Respuesta a las preguntas planteadas***

Por razones de propiedad, la planta que produce estos datos reales no se identifica, ni se identificará el producto. El estudio realizado por el maestro Barringer fue un proceso de 3 años en donde hubo variables en la confiabilidad evidenciables y permitieron dar ideas más claras acerca de las posibles soluciones a las preguntas planteadas.

Los resultados de la tabla 7 hacen un resumen de los datos evaluados para producción en los 3 años del estudio, se denota que los problemas de confiabilidad estuvieron presentes a lo largo del proceso y esto se ve reflejado en el indicador  $\beta$  Beta, ya que siempre se habló de un valor esperado de 100, sin embargo, con los resultados de la siguiente tabla, se pueden realizar análisis y sacar conclusiones de la confiabilidad en procesos productivos.

Tabla 7. Resultados experimento Barringer

<b>Resultados anuales</b>	1997	1998	1999	Promedio
Confiabilidad	30%	19%	24%	24%
<b>Pérdidas de producción (ton/año)</b>				
Pérdidas por confiabilidad	37%	76%	20%	45%
Eficiencia y utilización	2.091%	15.545%	4.376%	7.337%
Total de pérdidas	39%	92%	25%	52%
Equivalencia a días perdidos de producción	26	62	16	35
<b>Pérdidas de producción (\$/año)</b>				
Pérdidas por confiabilidad @0.10\$/lb	\$ 7,414,000	\$ 15,231,600	\$ 4,074,000	\$ 8,906,533
Eficiencia y utilización @0.10\$/lb	\$ 418,200	\$ 3,109,000	\$ 875,200	\$ 1,467,467
Total de pérdidas \$	\$ 7,832,200	\$ 18,340,600	\$ 4,949,200	\$ 10,374,000
<b>Producción demostrada</b>				
Eta ( $\eta$ ), salida demostrada (ton/día)	1511	1491	1503	1502
Beta ( $\beta$ ), factor de producción demostrado	76.8	53.2	88.3	72.8
<b>Producción esperada</b>				
Eta ( $\eta$ ), salida esperada (ton/día)	1515	1527	1514	1519
Beta ( $\beta$ ), factor de producción demostrado	100	100	100	100

Fuente: (Barringer P. H., Process Reliability Concepts, 2000)

Sobre los resultados se puede decir que sí existen problemas de confiabilidad con respecto a la eficiencia/utilidad de 6:1. Pérdidas por confiabilidad del 45%, comparadas con 7.33% de eficiencia.

Además, la capacidad que se pudo demostrar de producción en la planta fue de 1502 ton/día, mientras que la esperada era de 1519 ton/día. Hubo un déficit de 1.1% que se vieron afectados en las pérdidas en dólares de 10'374.000; donde casi el 90% lo representan las pérdidas por confiabilidad.

***Elemento 2 del Artículo 1 del Aparte 4 Sección 4 – Pérdidas de confiabilidad***

La confiabilidad es un indicador muy importante dentro del mantenimiento de toda planta de producción debido a que siempre existirán requerimientos del área de producción y para ellos deben ser confiables los activos que se encargan del proceso productivo.

Se pueden presentar pérdidas de confiabilidad debido a cambios de repuestos en los activos, en muchas ocasiones los activos son importados y sus repuestos son difíciles de conseguir, por lo tanto, se deben cambiar por repuestos que se adquieran fácilmente en el mercado local, interfiriendo en el funcionamiento normal de la máquina (Propia, 2019).

Los cambios de referencia en los procesos dan como resultado falta de producción o paro en el proceso y un cambio en la confiabilidad. El proceso de estudio tiene ese problema en el año 1998 tal como se puede ver en la tabla 7. Las fallas en el proceso se manifiestan como cúspides en la gráfica de producción demostrada (Woodrow@, 2016).

***Elemento 3 del Artículo 1 del Aparte 4 Sección 4 – Pérdidas de eficiencia y utilización***

Las pérdidas a causa de eficiencia y utilización están ligadas a los controles que tenga el área de producción y las órdenes de parte del departamento de ventas, debido a que son estas órdenes las que mueven la compañía y permiten el cumplimiento a los clientes finales del producto terminado.

En este orden de ideas, el departamento de ventas es el encargado de que se presenten pérdidas por eficiencia y utilización; en muchas ocasiones estas pérdidas se dan por un mal control de las prioridades con los clientes. Existen clientes grandes y otros no tan grandes, sin embargo, ambos son importantes y se deben atender con la misma calidad y orden.

Todo es una cadena y producción se encarga de programar las máquinas para una orden de compra que llega del departamento de ventas, sin embargo, un cliente diferente e importante hace otro pedido de carácter urgente y se deben cambiar las materias primas y los procesos que se venían trabajando, perdiendo la eficiencia que se traía del proceso anterior.

Es allí donde todo debe tener un orden y una planificación estricta para evitar este tipo de pérdidas que son muy comunes dentro de las grandes compañías y que, por dar satisfacción a un cliente mayorista e importante, se pierde la eficiencia y la utilización.

#### **Artículo 2 del Aparte 4 - Sección 4 - Resultados de análisis del autor**

Dentro del presente trabajo se realizaron todas las explicaciones necesarias para calcular los factores estadísticos que involucran a la distribución de Weibull. Tomando las teorías de dos grandes maestros (Maestro Barringer y Doctor Mora), el autor realizó algunos experimentos de los cuales compartirá sus resultados.

Los siguientes datos, no son reales, son datos experimentales realizados por el autor para entender y dar unas conclusiones acertadas de los indicadores estudiados a lo largo de este trabajo (Eta ( $\eta$ ) y Beta ( $\beta$ )).

Tabla 8. Resultados experimento autor

AJUSTE DE PARÁMETROS CON APROXIMACIÓN DE I-KAÉSIMO.				ALINEACIÓN CON REGRESIÓN-MÍNIMOS CUADRADOS.		
No. Dato	Datos de producción	Ordenados (De menor a mayor)	Benard F(t)	1/1-RM	Ln(Ln(1/1-RM) Es la regresión en Y	Ln(Datos de operación) Es la regresión en X
1	1200	1000	0.19%	1.0019	-6.2567	6.9078
2	1100	1004	0.47%	1.0047	-5.3680	6.9117
5	1300	1005	1.29%	1.0130	-4.3470	6.9127
6	1450	1005	1.56%	1.0158	-4.1527	6.9127
7	1220	1005	1.83%	1.0187	-3.9896	6.9127
8	1230	1006	2.11%	1.0215	-3.8491	6.9137
9	1210	1007	2.38%	1.0244	-3.7256	6.9147
10	1205	1008	2.65%	1.0273	-3.6154	6.9157
11	1300	1009	2.93%	1.0302	-3.5159	6.9167
12	1340	1009	3.20%	1.0331	-3.4252	6.9167
13	1309	1009	3.48%	1.0360	-3.3418	6.9167
14	1390	1010	3.75%	1.0390	-3.2646	6.9177
15	1362	1010	4.02%	1.0419	-3.1927	6.9177
16	1070	1012	4.30%	1.0449	-3.1255	6.9197
17	1296	1013	4.57%	1.0479	-3.0623	6.9207
18	1073	1013	4.84%	1.0509	-3.0027	6.9207
19	1439	1015	5.12%	1.0539	-2.9463	6.9226
20	1428	1017	5.39%	1.0570	-2.8928	6.9246
21	1427	1017	5.67%	1.0601	-2.8418	6.9246
22	1440	1020	5.94%	1.0631	-2.7932	6.9276
23	1023	1020	6.21%	1.0662	-2.7467	6.9276
24	1007	1021	6.49%	1.0694	-2.7022	6.9285
25	1104	1021	6.76%	1.0725	-2.6594	6.9285
26	1125	1023	7.03%	1.0757	-2.6183	6.9305
27	1349	1023	7.31%	1.0788	-2.5786	6.9305
28	1453	1024	7.58%	1.0820	-2.5404	6.9315
29	1124	1024	7.85%	1.0852	-2.5035	6.9315
30	1248	1025	8.13%	1.0885	-2.4678	6.9324
31	1207	1025	8.40%	1.0917	-2.4332	6.9324
32	1403	1025	8.68%	1.0950	-2.3996	6.9324

201	1083	1287	54.93%	2.2186	-0.2271	7.1601
202	1327	1287	55.20%	2.2321	-0.2195	7.1601
203	1185	1290	55.47%	2.2459	-0.2119	7.1624
204	1005	1293	55.75%	2.2597	-0.2043	7.1647
205	1296	1296	56.02%	2.2738	-0.1967	7.1670
206	1323	1296	56.29%	2.2880	-0.1891	7.1670
207	1434	1296	56.57%	2.3025	-0.1815	7.1670
208	1146	1297	56.84%	2.3171	-0.1740	7.1678
209	1337	1297	57.12%	2.3318	-0.1665	7.1678
210	1427	1298	57.39%	2.3468	-0.1589	7.1686
211	1083	1299	57.66%	2.3620	-0.1514	7.1694
212	1471	1299	57.94%	2.3774	-0.1439	7.1694
213	1492	1300	58.21%	2.3929	-0.1364	7.1701
214	1257	1300	58.48%	2.4087	-0.1289	7.1701
215	1397	1300	58.76%	2.4247	-0.1214	7.1701
216	1111	1300	59.03%	2.4409	-0.1139	7.1701
217	1214	1301	59.30%	2.4573	-0.1064	7.1709
218	1329	1304	59.58%	2.4739	-0.0989	7.1732
219	1117	1306	59.85%	2.4908	-0.0915	7.1747
220	1144	1308	60.13%	2.5079	-0.0840	7.1763
221	1188	1309	60.40%	2.5252	-0.0765	7.1770
222	1494	1309	60.67%	2.5428	-0.0691	7.1770
223	1150	1310	60.95%	2.5606	-0.0616	7.1778
224	1271	1312	61.22%	2.5787	-0.0542	7.1793
225	1262	1314	61.49%	2.5970	-0.0467	7.1808
226	1246	1317	61.77%	2.6156	-0.0393	7.1831
227	1325	1317	62.04%	2.6345	-0.0318	7.1831
228	1044	1320	62.32%	2.6536	-0.0244	7.1854
229	1424	1322	62.59%	2.6730	-0.0169	7.1869
230	1299	1322	62.86%	2.6927	-0.0095	7.1869
231	1351	1323	63.14%	2.7127	-0.0021	7.1877
232	1142	1324	63.41%	2.7330	0.0054	7.1884
233	1219	1325	63.68%	2.7536	0.0128	7.1892
234	1485	1325	63.96%	2.7745	0.0203	7.1892
235	1190	1327	64.23%	2.7957	0.0277	7.1907
236	1107	1327	64.50%	2.8173	0.0351	7.1907
237	1217	1327	64.78%	2.8392	0.0426	7.1907
238	1242	1329	65.05%	2.8614	0.0500	7.1922
239	1415	1329	65.33%	2.8840	0.0575	7.1922
240	1206	1329	65.60%	2.9069	0.0649	7.1922
241	1448	1334	65.87%	2.9302	0.0724	7.1959
242	1317	1335	66.15%	2.9539	0.0799	7.1967

327	1451	1449	89.41%	9.4419	0.8088	7.2786
328	1146	1450	89.68%	9.6923	0.8204	7.2793
329	1151	1450	89.96%	9.9564	0.8321	7.2793
330	1353	1450	90.23%	10.2353	0.8441	7.2793
331	1287	1451	90.50%	10.5303	0.8562	7.2800
332	1405	1451	90.78%	10.8427	0.8686	7.2800
333	1138	1453	91.05%	11.1743	0.8811	7.2814
334	1114	1453	91.32%	11.5268	0.8939	7.2814
335	1121	1454	91.60%	11.9023	0.9069	7.2821
336	1467	1456	91.87%	12.3030	0.9202	7.2834
337	1293	1458	92.15%	12.7317	0.9338	7.2848
338	1488	1461	92.42%	13.1913	0.9476	7.2869
339	1038	1463	92.69%	13.6854	0.9618	7.2882
340	1329	1463	92.97%	14.2179	0.9763	7.2882
341	1372	1463	93.24%	14.7935	0.9911	7.2882
342	1355	1464	93.51%	15.4177	1.0063	7.2889
343	1122	1467	93.79%	16.0969	1.0220	7.2910
344	1299	1468	94.06%	16.8387	1.0380	7.2917
345	1271	1469	94.33%	17.6522	1.0546	7.2923
346	1449	1470	94.61%	18.5482	1.0717	7.2930
347	1413	1471	94.88%	19.5401	1.0894	7.2937
348	1249	1471	95.16%	20.6441	1.1077	7.2937
349	1119	1474	95.43%	21.8802	1.1267	7.2957
350	1010	1474	95.70%	23.2739	1.1466	7.2957
351	1248	1480	95.98%	24.8571	1.1673	7.2998
352	1146	1485	96.25%	26.6715	1.1889	7.3032
353	1009	1488	96.52%	28.7717	1.2118	7.3052
354	1374	1488	96.80%	31.2308	1.2359	7.3052
355	1048	1492	97.07%	34.1495	1.2615	7.3079
356	1088	1492	97.35%	37.6701	1.2889	7.3079
357	1012	1493	97.62%	42.0000	1.3185	7.3085
358	1496	1494	97.89%	47.4545	1.3506	7.3092
359	1309	1494	98.17%	54.5373	1.3860	7.3092
360	1463	1495	98.44%	64.1053	1.4256	7.3099
361	1340	1496	98.71%	77.7447	1.4710	7.3106
362	1454	1498	98.99%	98.7568	1.5245	7.3119
363	1235	1499	99.26%	135.3333	1.5908	7.3126
364	1206	1500	99.53%	214.9412	1.6809	7.3132
365	1463	1500	99.81%	522.0000	1.8338	7.3132

Fuente: (Propia, 2019)

Tabla 9. Resultados indicadores experimento 1

	-
Intercepto	70.5870197
Beta	9.83009733
Etha	1313.83293
Productividad	1249.00352

Fuente: (Propia, 2019)

El primer experimento consiste en hacer una simulación de una planta que produce entre 1000 y 1500 toneladas por día de cualquier producto. Para eso se hace un aleatorio entre los márgenes de valores ya mencionados durante 365 días que conforman un año.

En el análisis de las variables estadísticas de Weibull se obtiene una salida de producción de 1313.83 ton/día; y una productividad promedio de 1249 Ton/día. Pero el dato que más relevancia tiene en este experimento es el valor que obtiene la pendiente. Barringer habla de un parámetro Beta deseado de 100, sin embargo, esta planta sólo obtiene un bajo 9.83.

Con base en el análisis anterior, el autor realiza otro experimento donde utiliza la misma planta de producción, pero rebaja el rango de producción a valores entre 850 y 900. El análisis realizado refleja una favorabilidad de Weibull para hallar la confiabilidad en procesos productivos, sin embargo, se convierte en sólo un deseo alcanzar los niveles de capacidad nominal para una planta con el nivel de orden suficiente en donde sus procesos sean cien por ciento confiables, ya que deberían sacrificar un tema muy importante, las ventas.

Tabla 10. Resultados experimento autor 2

AJUSTE DE PARÁMETROS CON APROXIMACIÓN DE I-KAÉSIMO.				ALINEACIÓN CON REGRESIÓN-MÍNIMOS CUADRADOS.		
No. Dato	Datos de producción	Ordenados (De menor a mayor)	Benard $F(t)$	1/1-RM	Ln(Ln(1/1-RM) Es la regresión en Y	Ln(Datos de operación) Es la regresión en X
1	875	850	0.19%	1.0019	6.25670897	6.74523635
2	864	850	0.47%	1.0047	5.36803365	6.74523635
3	864	850	0.74%	1.0074	4.90403486	6.74523635
4	887	850	1.01%	1.0102	4.58757539	6.74523635
5	899	850	1.29%	1.0130	4.34696409	6.74523635
6	860	850	1.56%	1.0158	4.15267562	6.74523635
7	890	850	1.83%	1.0187	3.98964626	6.74523635
8	871	851	2.11%	1.0215	3.84914222	6.74641213
9	852	851	2.38%	1.0244	3.72564504	6.74641213
10	859	851	2.65%	1.0273	3.61544444	6.74641213
11	853	851	2.93%	1.0302	3.51592557	6.74641213
12	878	851	3.20%	1.0331	3.42517616	6.74641213
13	881	851	3.48%	1.0360	3.34175539	6.74641213
14	863	851	3.75%	1.0390	-3.2645506	6.74641213
15	859	852	4.02%	1.0419	3.19268466	6.74758653
16	898	852	4.30%	1.0449	3.12545379	6.74758653
17	886	852	4.57%	1.0479	3.06228476	6.74758653

18	876	852	4.84%	1.0509	3.00270442	6.74758653
					-	
183	870	875	50.00%	2.0000	0.36651292	6.77422389
					-	
184	873	875	50.27%	2.0110	0.35862589	6.77422389
					-	
185	856	875	50.55%	2.0221	0.35075756	6.77422389
					-	
186	878	875	50.82%	2.0334	0.34290751	6.77422389
187	886	875	51.09%	2.0448	-0.3350753	6.77422389
					-	
188	889	876	51.37%	2.0563	0.32726052	6.77536609
					-	
189	894	876	51.64%	2.0679	0.31946275	6.77536609
					-	
190	897	876	51.92%	2.0797	0.31168157	6.77536609
					-	
191	892	876	52.19%	2.0916	0.30391657	6.77536609
					-	
192	894	876	52.46%	2.1036	0.29616734	6.77536609
					-	
193	872	876	52.74%	2.1158	0.28843348	6.77536609
					-	
194	856	876	53.01%	2.1281	0.28071457	6.77536609
					-	
195	866	876	53.28%	2.1406	0.27301021	6.77536609
					-	
196	865	876	53.56%	2.1532	0.26532002	6.77536609
					-	
197	879	876	53.83%	2.1660	0.25764357	6.77536609
					-	
198	873	876	54.11%	2.1789	0.24998049	6.77536609
					-	
199	863	877	54.38%	2.1920	0.24233038	6.77650699
					-	
200	882	877	54.65%	2.2052	0.23469284	6.77650699
					-	
201	872	877	54.93%	2.2186	0.22706748	6.77650699
					-	
202	856	877	55.20%	2.2321	0.21945392	6.77650699
					-	
203	876	878	55.47%	2.2459	0.21185176	6.77764659
					-	
204	893	878	55.75%	2.2597	0.20426061	6.77764659

205	888	878	56.02%	2.2738	-0.1966801	6.77764659
310	861	892	84.76%	6.5601	0.63181019	6.79346613
333	880	894	91.05%	11.1743	0.88112669	6.79570578
334	887	894	91.32%	11.5268	0.89391258	6.79570578
335	871	894	91.60%	11.9023	0.90693914	6.79570578
336	869	894	91.87%	12.3030	0.92022124	6.79570578
337	899	894	92.15%	12.7317	0.93377519	6.79570578
338	858	895	92.42%	13.1913	0.94761893	6.79682372
339	853	895	92.69%	13.6854	0.96177222	6.79682372
340	868	896	92.97%	14.2179	0.97625694	6.79794041
341	887	896	93.24%	14.7935	0.99109738	6.79794041
342	851	896	93.51%	15.4177	1.00632067	6.79794041
343	894	896	93.79%	16.0969	1.02195718	6.79794041
344	874	897	94.06%	16.8387	1.03804113	6.79905586
345	879	897	94.33%	17.6522	1.05461127	6.79905586
346	891	897	94.61%	18.5482	1.07171169	6.79905586
347	882	897	94.88%	19.5401	1.08939296	6.79905586
348	859	898	95.16%	20.6441	1.10771342	6.80017007
349	894	898	95.43%	21.8802	1.12674092	6.80017007
350	861	898	95.70%	23.2739	1.14655509	6.80017007
351	860	898	95.98%	24.8571	1.16725026	6.80017007
352	887	898	96.25%	26.6715	1.18893941	6.80017007
353	862	898	96.52%	28.7717	1.2117596	6.80017007
354	883	898	96.80%	31.2308	1.23587947	6.80017007
355	873	899	97.07%	34.1495	1.26151	6.80128303
356	856	899	97.35%	37.6701	1.28892041	6.80128303
357	852	899	97.62%	42.0000	1.31846232	6.80128303
358	870	899	97.89%	47.4545	1.3506082	6.80128303
359	854	899	98.17%	54.5373	1.3860156	6.80128303
360	873	900	98.44%	64.1053	1.42564162	6.80239476
361	855	900	98.71%	77.7447	1.47096407	6.80239476
362	879	900	98.99%	98.7568	1.52445934	6.80239476
363	900	900	99.26%	135.3333	1.59081373	6.80239476
364	870	900	99.53%	214.9412	1.68089576	6.80239476
365	883	900	99.81%	522.0000	1.83380753	6.80239476

Fuente: (Propia, 2019)

*Tabla 11. Resultados indicadores experimento autor 2*

	-
Intercepto	491.041274
Beta	72.4075559
Etha	881.504662
Productividad	874.641737

Fuente: (Propia, 2019)

El autor asimila un nuevo orden dentro de la compañía. Desde gerencia se tomaron directrices diferentes para mejorar la confiabilidad del proceso, lo que implica una menor exigencia para los activos, menor estrés de todas las áreas y una mejor respuesta a los clientes. De producir 1500 ton/día como máximo, la junta directiva toma la decisión de no producir más de 900 ton/día, pero no producir menos de 850 ton/día.

Esta decisión provoca un nuevo ordenamiento en todas las áreas. Mantenimiento ya tiene horarios disponibles para realizar preventivos sobre los activos fijos; el área de producción optimiza las materias primas de los productos próximos a producir evitando las pérdidas de eficiencia y utilización.

Se obtiene entonces, una salida de producción con valor entre el margen aplicado, 881.5 ton/día. Mientras que la productividad promedio fue de 874.64 ton/día. El parámetro que implica la pendiente y nos da una pista de cómo es la confiabilidad de ese proceso, es muy cercana al parámetro nominal o deseado propuesto por Barringer; para este caso fue de 72.4.

#### **Aparte 4 - Sección 4 - Conclusiones capítulo 4**

Según los resultados obtenidos por el Maestro Barringer y los resultados de los experimentos obtenidos por el autor de este documento, se puede concluir que el parámetro que mide la fiabilidad depende estrictamente de la dispersión de los datos de producción.

El factor Beta es menor cuando la dispersión de los datos de producción es muy amplia, alejándose de las metas que plantea Barringer y los porcentajes de confiabilidad denotan valores bajos, afectando las ventas y el capital de la empresa. Mientras este valor de Beta sea más cercano a 100, simboliza que los datos de producción son menos dispersos, que la producción es más controlada y por ende los procesos que se llevan en las diferentes áreas tienen mejor orden.

Si un proceso productivo no tiene control, se pueden presentar casos donde la dispersión de datos se convierte en falta de confiabilidad del proceso. La confiabilidad no es sólo un parámetro que une a confiabilidad con mantenimiento, sino un indicador que ayuda a los gerentes a entender cómo está funcionando la planta, a qué ritmo se debe trabajar y qué medidas tomar en momentos críticos del proceso.

Los procesos se ven afectados por el estrés que genera producir a la máxima capacidad de la planta, los activos sufren más de lo normal ya que son llevados al límite y el área de producción se vería afectada por los imprevistos de las fallas.

Una planta que produce el mismo valor de unidades por día durante los 365 días que tiene un año, es una planta que obtiene un valor de Beta igual a 100. Sin embargo, este ideal de planta es considerado una fantasía. Todos los procesos productivos tienen dispersiones y no todos los

días se produce lo mismo, pero se pueden realizar esfuerzos donde el control sea mucho mayor en las áreas de ventas y producción para que las salidas sean más constantes y se lleguen a valores Beta más cercanos a 100.

## **Sección 5 – Conclusiones**

### **Aparte 1 - Sección 5 - Objetivo**

Concluir los resultados obtenidos para dar un aporte al estudio de los procesos y comportamientos productivos.

### **Aparte 2 - Sección 5 - Introducción**

Se ha probado a lo largo de este trabajo que es factible determinar parámetros de confiabilidad utilizando la distribución Weibull, tanto para estudios de mantenimiento como para producción. Ambos estudios tienen un tratamiento de los datos diferentes, pero la concepción es la misma y basa sus resultados estadísticos en probabilidades que pueden traer ahorros significativos a las compañías que lo empleen.

Bajo los resultados obtenidos y con los objetivos que se pactaron al inicio de este trabajo, se presentan las conclusiones generales en esta sección.

### **Aparte 3 - Sección 5 - Desarrollo**

Las conclusiones son el resultado de la investigación para evaluar la confiabilidad aplicada a los procesos productivos y así lograr un mejor panorama de la capacidad de producción basada en porcentajes probabilísticos en dos segmentos, la producción y el mantenimiento. En el desarrollo de este capítulo se entiende hacia dónde se quiere concluir este trabajo y el propósito que tuvo la investigación.

### **Artículo 1 del Aparte 5 - Sección 5 - Primera conclusión**

Las metodologías estadísticas tienen un marco teórico que logra ser explicado bajo las concepciones técnicas de fiabilidad y sistemas kantianos para llevar al lector a entender la inclusión del mantenimiento y la producción en un todo y así lograr la aceptación del fuerte vínculo que debe existir entre ellas para llegar a obtener una alta confiabilidad en los procesos productivos.

Diferenciando las necesidades de cada área, el conocimiento aportado en este trabajo cumple con las definiciones necesarias y justifica la importancia de obtener indicadores para una buena planeación del mantenimiento y la producción.

### **Artículo 2 del Aparte 5 - Sección 5 - Segunda conclusión**

Lo que no se mide, no se controla, por eso este trabajo logra dar la explicación necesaria, para seguir la metodología precisa que lleva a la obtención de los indicadores que darán a los ingenieros encargados del control de los procesos, la aproximación de la confiabilidad que permita controlar estratégicamente la organización.

Los costos, el tiempo y el personal, son tres factores importantes dentro de cada proceso productivo y que pueden llevar a una organización al éxito o a la ruina. Todos tres llevan a un bien común, las máquinas, ese estrecho vínculo entre mantenimiento y producción.

Los activos fijos de cada organización tienen una depreciación propia e innata desde su momento de adquisición y su preservación en el tiempo depende de las personas que lo operen. Por eso dentro de la ecuación de cada ingeniero no puede faltar el conducto necesario con su

personal de trabajo, que deberá usar de buena manera el material suministrado por la compañía para lograr el buen funcionamiento de las máquinas que desencadenará en un proceso confiable.

### **Artículo 3 del Aparte 5 - Sección 5 – Tercera conclusión**

Es importante tener un modelo a seguir para cada metodología que se quiere optar. Siempre es más fácil para un ingeniero, captar la información de una manera ilustrativa y entendible para la gestación de un proyecto o simplemente para el control de uno. Los aportes generados en este trabajo mediante la inclusión de la metodología Weibull, precisamente pretenden dar ese modelo ilustrativo, fácil y práctico para llevar el control de un proceso.

Existe una diferencia entre el gasto por depreciación y el gasto por mantenimiento cuando se habla de las máquinas. Como se habló anteriormente, las máquinas o activos que conforman cada proceso en las etapas productivas, tienen un precio de adquisición, hasta el momento en que se deprecia totalmente, sin embargo, es importante entender que no es lo mismo una máquina depreciada, a una máquina obsoleta.

De ahí la importancia de la implementación de Weibull y su impacto en la vida útil dependiendo de la cantidad de fallos que pueda tener. Según los cálculos realizados por la metodología Weibull, se puede obtener una máquina obsoleta, pero no depreciada y es ahí donde se generan puntos críticos en el proceso general.

Se habla de puntos críticos por el gasto que representa un activo que, según los cálculos, ha llegado a generar sobre costos en mantenimiento y su lugar en la curva de la bañera muestra una

etapa de envejecimiento, y a pesar de ello no se ha depreciado por completo, lo que representaría una baja que afecta directamente el precio del producto, llevando al negocio a no ser próspero.

Es mucho mejor adquirir un activo de buena calidad para que llegue a ser obsoleto cuando llegue a su depreciación final y no un activo de baja calidad que llegue a la fase de envejecimiento sin ser depreciado completamente.

#### **Artículo 4 del Aparte 5 - Sección 5 – Cuarta conclusión**

La manera en que se traten los datos para los intereses de mantenimiento y producción son diferentes, pero finalmente este trabajo pudo vincularlos y demostrar que existe una misma metodología que permite repotenciar ambas áreas. El factor beta o factor de forma es el indicador que más puede hablar sobre el impacto de la producción en el sistema general evaluando los puntos críticos y dando la idea, tanto a mantenimiento como a producción del cómo se está comportando cada proceso.

Para mantenimiento, este factor Beta puede indicar en qué punto de la vida útil se encuentra un activo; mientras que para producción el manejo es diferente porque indica la dispersión de los datos en un período determinado. Si los valores de producción se manejan en rangos muy amplios, el factor beta mostrará valores bajos y denotará un proceso desorganizado; por el contrario, si los rangos en que se maneja la producción son estrechos durante un período de tiempo extenso, el factor beta tendrá tendencia a 100 y denotará procesos más organizados.

Para tener el control completo del sistema productivo, se puede fijar un propósito de producción diaria en donde no se haga un sobre esfuerzo de la capacidad nominal de la planta,

pero sin contratiempos que produzcan una variación grande en los datos. Si esa dispersión de datos se controla, la distribución Weibull se irá comportando de una manera uniforme y el valor Beta o factor de forma se aproximará al ideal de 100.

### **Bibliografía**

Abernethy, R. B. (2006). *The New Weibull Handbook*. Florida: Abernethy.

Akao, Y. (1998). *Function Deployment: Integrating Customer Requirements Into Product Design*. Cambridge, MA.

Alcántara, E. -V. (2010). *Análisis de la movilidad urbana - Espacio, medio ambiente y equidad*. Bogotá, Cundinamarca, Colombia: Corporación Andina de Fomento de Colombia.

American National Standard. (1997). *Model for Quality Assurance in Design/Development, Production, Installation, and Servicing*. American Society for Quality Control.

ANDES@, E. A. (06 de 06 de 2014). *Los Andes Economía*. Recuperado el 14 de 08 de 2017, de Buenos Aires: <http://www.losandes.com.ar/article/el-gobierno-pidio-que-los-precios-bajen-10-por-ciento-792717>

AUTOECOLÓGICOTOYOTA@. (14 de 06 de 2014). *Toyota*, Simple. (www.enter.co, Editor, & TOYOTA) Recuperado el 22 de 09 de 2017, de Autor Laura Rojas: <http://www.enter.co/cultura-digital/ciudadinteligente/toyota-presenta-el-automovil-sonado-sin-gasolina-ni-polucion/>

Autos1@. (11 de 2 de 2013). *Club Ensayos*. (México, Editor, & Fabiola, Productor) Recuperado el 18 de 09 de 2017, de Ensayo Agencia De Autos: <https://www.clubensayos.com/Temas-Variados/Ensayo-Agencia-De-Autos/538372.html>

Barret&Bloom@. (26 de Agosto de 2012). *Taxonomía de la Educación y delos Proyectos empresariales*, Simple. (Bloom Barret y Gagne) Recuperado el 26 de Agosto de 2012, de Barrett, Dr. Frederick C.: <http://www.bnm.me.gov.ar/cgi-bin/wxis.exe/opac/?IsisScript=opac/opac.xis&dbn=BINAM&src=link&tb=tem&query=P LANIFICACION+DE+LA+CLASE>

Barringer, P. H. (17 de 04 de 2000). *Process Reliability Concepts*. Recuperado el 01 de 02 de 2017, de Process Reliability Concepts: <http://www.barringer1.com>

Barringer, P., & Woodrow, R. (2008). *New Reliability Tool For The Milenium: Weibull Analysis of Pruduction Data*.

Barringer@, H. P. (2005). *Availability, Reliability, Maintainability, and Capability*. (P. H. Paul Barringer, Ed.) Recuperado el 11 de Noviembre de 2008, de Availability, Reliability, Maintainability, and Capability: <http://www.barringer1.com/lcc.htm>

Barringer@, P. H., & Woodrow, R. J. (10 de 03 de 2002). *Process Reliability: Do You Have It?* Recuperado el 11 de 04 de 2017, de Process Reliabiliti: <http://www.barringer1.com/pdf/Barringer-Roberts-AICHE-Paper.pdf>

Beer, M., & Eisenstat, R. (1990). Why Change Programs Don't Produce Change. *Harvard Bussiness Review*, 158-166.

Bertalanffy, L. v. (1994). *Teoría General de los Sistemas*. Bogotá, Cundinamarca, Colombia: Fondo de Cultura Económica Limitada.

- Blanchard, B. S. (1995). *Ingeniería Logística – Traducido de Logistics Engineering and Maintenance – ISDEFE*. Madrid, España: ISDEFE© - Monografias.com.
- Blanchard, B. S., Verma, D., & Peterson, E. (1994). *Series Nuevas dimensiones en Ingeniería - Maintenibility: a key to effective serviceability and maintenance management*. USA: Edit. Wiley Interscience - Wiley, John & Sons, Incorporated.
- Camp, R. C. (1989). *Benchmarking Milwaukee*. ASQC Quality Press.
- Chappell, L. (27 de Abril de 1992). Plant Floor Is Fertile Soil For Ideas. *Automotive News*, págs. 50-62.
- Chiavenato, I. (2005). *Introducción A La Teoría General De La Administración* (Séptima ed.). Madrid, España: McGraw Hill.
- Cuervo, J. (03 de 10 de 2017). Clase de Fundamentos de Investigación. Medellín, Antioquia, Colombia.
- DesignCar. (13 de 08 de 2017). *You Tube*. Recuperado el 13 de 08 de 2017, de <https://www.youtube.com/watch?v=Xf9sEyTSWrA>
- Domínguez, G. (1999). *Indicadores de Gestión* (Segunda edicion ed.). Medellín, Antioquia, Colombia: Biblioteca Jurídica Dike.
- EBEL@. (2004). *Biografías y Vidas*. Recuperado el 15 de 08 de 2017, de EBEL Encicloopedia Biográfica En Línea: <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/k/kant.htm>

- Ebeling, C. E. (2005). *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. (I. Waveland Press, Ed.) New York City, New York, USA: McGraw-Hill Science - Engineering - Math.
- Ecodes@. (09 de Abril de 2008). *www.ecodes.org*. (Diario el Pais) Recuperado el 01 de Agosto de 2012, de <http://www.ecodes.org/noticias/lavar-el-coche-con-manguera-consume-mas-de-500-litros-de-agua>
- ESReDa-Industrial. (1998). *Industrial Application of Structural Reliability Theory* (ESReDa - European Safety, reliability and Data ed., Vol. ESReDa Safety Series No. 2). (P. T.-C.-D. DNV, Ed.) Hovik, Norway: ESReDa Working Group Report.
- Evans, D. W. (1975). *Terotechnology - How can it work*. Inglaterra, Inglaterra.
- FI-UPB. (15 de 3 de 2009). Material de apoyo académico - Fundamentos de Investigación. *Investiogación*, 11. Medellín, Antuioquia, Colombia: UPB Facultad de Diseño.
- FNUAP. (2001). Poblacion y cambio del medio ambiente. En F. d. Unidas. Nueva York: Fondo de Poblacion de las Naciones Unidas.
- Forcadas, J. -F. (1983). Estadística aplicada a los Sistemas & Confiabilidad en los Sistemas. *I*(4), 41.
- Gery, G. J. (1991). *Electronic Performance Support Systems: How and Why to Remake the Workplace Trhough the Strategic Application of Technology*. Boston: Weingarten Publications Inc.

- HajShirmohammad, A., & Wedley, W. C. (2004). Maintenance management – an AHP application for centralization/decentralization. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 10(ISSN 1355-2511), 16 a 25.
- Hronec, S. M. (1995). *Signos Vitales - El empleo de las medidas del rendimiento, de la calidad, el tiempo y el coste para proyectar el futuro de la empresa – Arthur Andersen -*. (S. Edigrafos, Ed.) Madrid, Comunidad de Madrid, España: McGraw Hill & Interamericana de España, S.A.
- Hronec, S. M., & Hunt, S. (1992). *Quality and Cost Management*. Boston: Warren, Gorhan & Lamont.
- Ibarra, C. (26 de 10 de 2011). *Investigaciones Exploratoria, Descriptiva, Explicativa y Correlacional*. Recuperado el 08 de 10 de 2017, de Investigaciones Seriadadas: <http://metodologadelainvestigacinsiis.blogspot.com.co/2011/10/tipos-de-investigacion-exploratoria.html>
- IED. (07 de 08 de 2017). *Instituto Europeo de Diseño*. Recuperado el 07 de 08 de 2017, de Diseño Automotriz: [http://www.verificaprezzi.it/s/Istituto%20ied?gclid=EAIaIQobChMIxOKe7IPG1QIViiWBCh2Tqw-LEAAYByAAEgK7RvD\\_BwE](http://www.verificaprezzi.it/s/Istituto%20ied?gclid=EAIaIQobChMIxOKe7IPG1QIViiWBCh2Tqw-LEAAYByAAEgK7RvD_BwE)
- Jablonski, J. R. (1991). *Implementing Total Quality Managment: An overview*. Albuquerque: Technical Management Consortium.

- Jones, R. (1995). *Risk Based Management: A reliability – Centered Approach* - Gulf Publishing Company. Houston, Texas, USA: Gulf Professional Publishing.
- Juran, J. M., & Gryna, F. M. (1989). *Juran on Leadership for Quality: An Executive Handbook*. Nueva York: The Free Press.
- Kankinson, H., & Lloyd, S. P. (1992). Change Management. En B. J. Brinker, *Handbook of Cost Management* (págs. E2-1 - E2 - 22). Boston: Warren, Gorham & Lamont.
- Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (1997). *El cuadro de mando integral – Edición Especial KPGM Latinoamérica* – (Primera Edición ed.). Barcelona, Catalunya, España: Ediciones Gestión 2000, S.A.
- Kececioglu, D. (1995). *Maintainability, Availability, & Operational Readiness Engineering*. New Jersey City, New Jersey, USA: Editorial Prentice-Hall Professional Technical.
- Knezevic, J. (1996). *Mantenibilidad*. Madrid, Provincia de Madrid, España: Editorial ISDEFE.
- Leemis, L. M. (1995). *Reliability: Probabilistic Models and Statistical Methods*. New Jersey City, New Jersey, USA: Editorial Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering.
- Management, A. (1991). *Blueprints for service quality: The Federal Express approach*. Nueva York: American society for quality control.
- Marks, J. (1997). *Combining TPM and reliability-focused maintenance (RCM), reliability centered maintenance, electric maintenance & repair* (Vol. Volumen 211). USA.

- Martínez, R. -A. (27 de 10 de 2016). *El Colombiano Periódico*. (E. Colombiano, Editor)  
Recuperado el 23 de 09 de 2017, de <http://m.elcolombiano.com/electricidad-el-nuevo-combustible-de-la-movilidad-en-medellin-CY5247224>
- McC. (28 de 09 de 2017). *Movilidad con Ciencia. Movilidad con Ciencia*. Medellín, Antioquia, Colombia: EAFIT.
- Montero, J. C., & Díaz, C. A. (2013). Boletín técnico No. 33. *Modelo para Medición de Eficiencia Real de Producción y Administración Integrada de Información en Planta de Beneficio.*, 72.
- Mora, A. -G. (1999). *Selección y jerarquización de las variables importantes para la gestión de mantenimiento en empresas usuarias o generadoras de tecnologías avanzadas*. Tesis de doctorado - Ph.D. en Ingeniería Industrial Cum Laude, Universidad Politécnica de Valencia, Organización de Empresas, Valencia.
- Mora, A. -G. (2007). *Mantenimiento Estratégico para empresas industriales o de servicios* (Segunda ed.). Envigado, Antioquia, Colombia: AMG.
- Mora, A. -G. (2007a). *Mantenimiento Estratégico para empresas industriales o de servicios* (Segunda ed.). Envigado, Antioquia, Colombia: AMG.
- Mora, A. -G. (2009). *Mantenimiento. Planeación, ejecución y control* (Primera ed.). México, México Distrito Capital, República de México: AlfaOmega Editores Internacionales.

Mora, A. -G. (2013). *Mantenimiento Planeación Ejecución y Control*. Bogotá, Cundinamarca, Colombia: AlfaOmega Editore Internacionales.

Mora, A. -G. (2014). *Mantenimiento Industrial Efectivo* (Tercera ed.). Medellín, Antioquia, Colombia: COLDI Limitada.

Mora, A. L. (2017). *Mantenimiento Industrial Efectivo*. Medellín.

Moubray, J. M. (2004). *RCM Reliability Centered Maintenance - Industrial Press Inc* (Primera en castellano ed.). (G. a. Biddles Limited, Ed., & S. y.-A. Ellman, Trad.) Leicestershire, United Kingdom: Aladon Limited.

Moubray@. (2001). *John. About RCM*. Recuperado el 19 de Diciembre de 2008, de Aladon inglaterra: <http://www.aladon.co.uk/02rcm.htm>

Nachlas, J. (1995). *Fiabilidad*. Madrid, Provincia de Madrid, España: ISDEFE.

Novak, J. (23 de 09 de 2017). *Mapas Conceptuales*. Recuperado el 23 de 09 de 2017, de <http://mapaconceptual.net/conectores-para-mapas-conceptuales>

NS@. (September de 2005). *Nist/Sematech - E-Handbook os Statistical Methods*. Recuperado el 29 de Abril de 2003, de <Http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>

O'Connor, P. D. (2002). *Practical Reliability Engineering* (Cuarta ed.). Stevenage, United Kigdom: Wiley - Jhon Wiley & Son.

- Pininfarina. (07 de 08 de 2017). *Empresa italiana de diseño e ingeniería*. (Empresa Escuela de diseño e ingeniería italiana, automotriz) Recuperado el 07 de 08 de 2017, de <http://www.pininfarina.com/it/homepage/homepage.htm>
- Propia. (2019). *Confiabilidad en procesos productivos*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Ramakumar, R. (1996). *Engineering Reliability. Fundamentals and Applications*. New Jersey City, New Jersey, USA: Editorial Prentice-Hall Professional Technical.
- Reliasoft. (01 de 01 de 2017). *Life Data Analysis Reference*. (R. Corporation, Ed.) Recuperado el 11 de 10 de 2017, de <http://www.reliawiki.org>:  
[http://www.synthesisplatform.net/references/Life\\_Data\\_Analysis\\_Reference.pdf](http://www.synthesisplatform.net/references/Life_Data_Analysis_Reference.pdf)
- Reliasoft@. (2008). *Reliasoft*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2008, de Reliasoft:  
<http://www.reliasoft.com/support/faq.htm>
- Rojas, J. -A. (1975). *Introducción a la confiabilidad*. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.
- Sánchez, J. P. (04 de 08 de 2017). *El Espectador*.
- Sotskov, B. (1972). *Fundamentos de la Teoría del Cálculo de la Fiabilidad de Elementos y Dispositivos de Automatización y Técnica del Cálculo*. Moscú, Rusia: Editorial MIR.
- Suarez, O. (23 de 09 de 2017). Elaboración propia. (A. V. González, Trad.) Medellín, Antioquia, Colombia.

Tamborero@, J. M.-D. (2005). *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo - España*.

Recuperado el 1 de 12 de 2008, de Misnisterio del Trabajo y Asuntos Sociales - España:

[http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp\\_](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_)

Thorsteinsson, U., Luxhoj, J. T., & Riis, J. O. (1997). Trends and Perspectives in industrial Maintenance Management. *Journal of Manufacturing Systems*, 16(6).

Vallejo, J. J., & Mora Gutiérrez, L. A. (2004). *Desarrollo, validación, contraste y pronóstico del cálculo CMD - Trabajo de fin de carrera de Ingeniería Mecánica*. Medellín , Antioquia, Colombia: Universidad EAFIT.

Whorf, B. L. (1952). *Collected Papers on Metalinguistic – Foreign Service Institute – Department of State*. Washington – USA : Referenciado por Bertalanffy,1994.

Whorf, B. L. (1953). *Language, Thought and reality: selected writings of B.L. Whorf – John Caroll, Ed. John Wiley & Sons*. Nueva York – USA: Referenciado por Bertalanffy,1994.

Wireman, T. (1994). *Computerized Maintenance Management System*. USA: Editorial Industrial Press.

Wireman, T. (2004). *Total Preventive Maintenance*. Nueva York, New York, USA.

Woodrow@, R. T. (01 de 01 de 2016). <http://www.barringer1.com/pdf/Roberts-Barringer-Paper.pdf>. Recuperado el 31 de 03 de 2018, de <http://www.barringer1.com>:  
<http://www.barringer1.com>

Zapata, S. A. (17 de 09 de 2017). *Verbo Bloom & Gagné*, Simple. Recuperado el 17 de 09 de 2017, de <https://es.scribd.com/doc/59828818/Verbo-Bloom-Gagne>