

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA



**“DESARROLLO DE UN MODELO CONCEPTUAL PARA LA ESTIMACIÓN
DE LAS FRECUENCIAS DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO
EN LAS METODOLOGÍAS DE ESTIMACIÓN MÁS UTILIZADAS EN EL
ESCENARIO INDUSTRIAL”**

REALIZADO POR:

ALVARO JOSE HERNÁNDEZ SUÁREZ

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO ANTE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

Puerto La Cruz, Agosto de 2009

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA



**“DESARROLLO DE UN MODELO CONCEPTUAL PARA LA ESTIMACIÓN
DE LAS FRECUENCIAS DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO
EN LAS METODOLOGÍAS DE ESTIMACIÓN MÁS UTILIZADAS EN EL
ESCENARIO INDUSTRIAL”**

ASESORES

Prof. Darwin Bravo
Asesor Académico

Puerto La Cruz, Agosto de 2009

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA



**“DESARROLLO DE UN MODELO CONCEPTUAL PARA LA ESTIMACIÓN
DE LAS FRECUENCIAS DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO
EN LAS METODOLOGÍAS DE ESTIMACIÓN MÁS UTILIZADAS EN EL
ESCENARIO INDUSTRIAL”**

El Jurado hace constar que asignó a esta Tesis la calificación de:

EXCELENTE

Prof. Darwin Bravo
Asesor Académico

Prof. Henry Espinoza
Jurado Principal

Prof. Luis Griffith
Jurado Principal

Puerto La Cruz, Agosto de 2009

ARTÍCULO 44

DE ACUERDO AL ARTÍCULO 44 DEL REGLAMENTO DE TRABAJO DE GRADO:

“LOS TRABAJOS DE GRADO SON DE EXCLUSIVA PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE Y SOLO PODRÁN SER UTILIZADOS A OTROS FINES CON EL CONSENTIMIENTO DEL CONSEJO DE NÚCLEO RESPECTIVO, QUIEN LO PARTICIPARÁ AL CONSEJO UNIVERSITARIO”.

DEDICATORIA

Hay una persona **EN ESPECIAL** que quiero dedicar el logro de tan ansiada meta y es a **MI MADRE** y empiezo con estas palabras: **LO LOGRAMOS**. Ese espíritu de lucha antes la adversidades y el no dejarme vencer sin dar lo mejor de mí lo aprendí de ti y aquí estoy al final del camino viendo coronando tu anhelo de verme graduado y teniendo una carrera profesional para enfrentar la vida por delante. Este título llevará mi nombre pero mas que mío es **TUYO. TE AMO**.

A mi hermana **MARIA ALEJANDRA**. Tu, nuestra madre y yo hemos pasado las buenas y las malas como un equipo, apoyándonos y luchando juntos para salir adelante, por eso, este logro, igualmente, te pertenece y quiero que lo sientas así. **TE AMO**.

A la memoria de mi abuela **JOSEFINA** y mi abuelo **GUALBERTO**, quienes fueron otros padres para mí, y que desde muy pequeño estuvieron a mi lado brindándome su ejemplo y sus palabras de aliento para ser mejor cada día. También, a la memoria de mi abuelo **ANTONIO**, quien en vida fue una persona especial y nos brindó toda la ayuda y el apoyo cuando más lo necesitamos. **NO LOS OLVIDARE** y su recuerdo vive en mi corazón.

A mi sobrina **SARITA**. Desde que llegaste a nuestras vidas te has convertido en un sol que brilla y nos llena a todos de profunda alegría. Quiero que este logro de tu tío se convierta en una motivación para que cuando estés más grande y te enfrentes a los grandes retos que tiene la vida preparados para ti salgas adelante y nunca dejes de luchar. **TE AMO**.

AGRADECIMIENTO

A mi cuñado, Germán Pardo, quien siempre ha estado dispuesto a ofrecerme su apoyo y colaboración.

A mis panas, José Villarroel, Hernán Londoño, Alvaro Pérez, Emir Arismendi, Antonio Jiménez, Alvaro Kovac, Gilbert Velásquez, Sixto Alfonzo, Arenel Velásquez y Rolando Cubillán.

A Yrania Sánchez, por convertirse en un apoyo y una fuente de inspiración cuando más lo necesitaba.

A Mariedby Villarroel, con quien he formado una bonita amistad y que ha estado allí para brindarme su ayuda cuando así lo necesite.

Al profesor Darwin Bravo, por sus valiosos conocimientos y por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo de investigación.

Al profesor Diógenes Suárez por su gran aporte a esta investigación.

A los profesores Héctor Meza y Víctor Mora por su valiosa ayuda.

Al Dr. Ezequiel Bellorín, quien ha sido responsable de mi recuperación.

A toda mi familia, en especial a mi Padre.

Y toda aquella persona que haya puesto un granito de arena en el logro de esta meta.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal el desarrollo de un modelo para determinar la frecuencia de mantenimiento preventivo. Esta frecuencia representa el tiempo a transcurrir entre dos inspecciones o de realización de un trabajo de mantenimiento de un equipo o componente. El diseño de este modelo busca proponer una nueva herramienta que, basándose, en el comportamiento real del equipo, el contexto operacional donde opera, la data con la que se cuente del mismo, y las políticas de mantenimiento propias de cada empresa, permita establecer los planes orientados al logro de una intervención oportuna y costo-eficiente de los activos físicos. El modelo en referencia sugiere en base al nivel de criticidad de los equipos dentro del proceso productivo, los métodos para determinar los períodos de intervención. Para los equipos no críticos, se aplica la política de dejar funcionar hasta fallar, en el caso, de los equipos semi- críticos, la frecuencia de inspección o mantenimiento se establece basados en el método del MCC y para los equipos críticos, se plantean diferentes metodologías según la tarea de mantenimiento este basada en la condición o en el tiempo o uso del equipo. Finalmente, se formulan indicadores de gestión de mantenimiento, con el objeto de hacer una valoración cuantitativa del rendimiento de los activos y la efectividad del mantenimiento al ser implementadas las nuevas frecuencias. El modelo desarrollado ofrece una alternativa a los métodos convencionales que se emplean para la estimación de las frecuencias de mantenimiento y ofrece un método eficaz para alcanzar una intervención oportuna de los activos de una organización.

CONTENIDO

ARTÍCULO 44	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
RESUMEN.....	vii
CONTENIDO	viii
LISTA DE TABLAS	xii
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
CAPITULO I.....	16
INTRODUCCIÓN	16
1.1 Planteamiento del problema.....	18
1.2 Objetivos	20
1.2.1 Objetivo general.....	20
1.2.2 Objetivos específicos	20
1.3 Justificación de la investigación.....	21
CAPITULO II	10
MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 Antecedentes	10
2.2 Fundamentos teóricos	11
2.2.1 Definición de Modelo	11
2.2.2 El Mantenimiento.....	12
2.2.3 Frecuencia	15
2.2.4 Inspección	16
2.2.5 Análisis de Criticidad.....	16
2.2.6 Definición de Falla.....	17
2.2.7 Gestión de Mantenimiento	19
2.2.8 Metodologías para estimar la frecuencia de mantenimiento.....	22

CAPITULO III	59
MARCO METODOLÓGICO	59
3.1 Tipo de investigación	59
3.1.1 Según la Estrategia.....	59
3.1.2 Según su Propósito:.....	59
3.1.3 Según el nivel de conocimiento	59
3.2 Población y muestra	60
3.3 Técnicas de investigación	60
3.3.1 Técnicas de recolección de información	60
3.3.2 Técnicas de análisis de la información.....	61
3.4.- Etapas de la investigación.....	62
CAPITULO IV	65
DESARROLLO DEL MODELO	65
4.1 Descripción de las metodologías empleadas para la estimación de las frecuencias de mantenimiento preventivo.....	66
4.1.1 Estimación de frecuencias de mantenimiento basados en los históricos de fallas.....	66
4.1.2 Estimación de la frecuencia basados en la confiabilidad.....	69
4.1.3 Modelos matemáticos para políticas de mantenimiento propuesto por Barlow y Hunter.....	75
4.1.4 Estimación de la frecuencia basados en el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)	82
4.1.5 Estimación de la frecuencia usando el Análisis Costo Riesgo Beneficio (ACRB).	89
4.1.6 Estimación de la frecuencia de inspección de Mantenimiento Predictivo... 103	
4.1.7 Estimación de la frecuencia usando las Cadenas de Markov (Modelo de MBC)	105
4.2 Aspectos relevantes de la estimación de las frecuencias de mantenimiento preventivo empleando las distintas metodologías.....	116

4.2.1 Aspectos relevantes de la estimación de frecuencias basados en los históricos de fallas	116
4.2.2 Aspectos relevantes de la estimación de frecuencias basados en confiabilidad.	117
confiabilidad.....	118
4.2.3 Aspectos relevantes de la estimación de frecuencias usando modelos propuestos por Barlow y Hunter (políticas de mantenimiento I y II).	119
4.2.4 Aspectos relevantes de la estimación de frecuencias basados en el Mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC).	120
MCC.....	121
4.2.5 Aspectos relevantes de la estimación de frecuencias usando el análisis de costo- riesgo- beneficio (ACRB).	121
4.2.6 Aspectos relevantes de la estimación de la frecuencia de inspección de Mantenimiento Predictivo.....	122
las inspecciones predictivas	123
4.2.7 Aspectos relevantes de la estimación usando las cadenas de Markov (modelo del MBC).....	124
4.3 Desarrollo del Modelo	125
4.3.1 Etapa previa.- Conformación del equipo natural de trabajo (ENT).....	126
4.3.2 Etapa I.- Recopilación de información sobre los equipos.....	127
4.3.3 Etapa II.- Análisis de la información recopilada.....	129
4.3.4 Etapa III.- Jerarquización de los equipos	130
4.3.5 Etapa IV.- Selección de las metodologías de estimación de la frecuencia del mantenimiento preventivo.....	131
4.3.6 Etapa V.- Estimación e implementación de las nuevas frecuencias del mantenimiento preventivo.....	137
4.4 Formulación de indicadores para la evaluación de la gestión de mantenimiento basados en la aplicación del modelo desarrollado.	141
4.4.1 Indicadores de efectividad.....	141

4.4.2 Indicadores claves de rendimiento (KPI).....	143
4.4.3 Índices de seguridad y medio ambiente:	146
CAPITULO V	150
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	150
5.1. Conclusiones	150
5.2. Recomendaciones.....	152
BIBLIOGRAFÍA	154
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO	157

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de la degradación [12].....	50
Tabla 4.1 Descripción de las fallas, modos, tef y número de fallas.....	67
Tabla 4.2.- Valores de los TEF y número de fallas.....	68
Tabla 4.3.- Resultados de los valores de los TMEF.....	68
Tabla 4.4.- Valores de los TEF	73
Tabla 4.5.- Evaluación del costo esperado. [5]	81
Tabla 4.6.- Evaluación del costo esperado. [5]	82
Tabla 4.7.- Probabilidad aceptable de falla. [11]	83
Tabla 4.8.- Clasificación de la severidad. [11].....	84
Tabla 4.9.- Modelos típicos de probabilidad de falla. [15]	93
Tabla 4.10.- Fuentes de información para la evaluación de las consecuencias de falla. [15]	95
Tabla 4.11.- Costo modelado a diferentes frecuencias.....	97
Tabla 4.12.- Riesgo estimado en el período a evaluar.	98
Tabla 4.13.- Impacto total simulado a distintas frecuencias.....	100
Tabla 4.14.- Valores del impacto total obtenidos de la suma punto a punto.	102
Tabla 4.17.- Simulación de la disponibilidad para distintos valores de λ_{in} y n.....	116
Tabla 4.18.- Fortalezas y debilidades del uso de los registros históricos.....	117
Tabla 4.19.- Fortalezas y debilidades de la estimación de la frecuencia basados en la confiabilidad.....	118
Tabla 4.20.- Fortalezas y debilidades de las políticas I y II.....	120
Tabla 4.21.- Fortalezas y debilidades de la estimación de la frecuencia basados en el MCC.....	121
Tabla 4.22.- Fortalezas y debilidades del ACRB.....	122
Tabla 4.23.- Fortalezas y debilidades del método de estimación de la frecuencia de las inspecciones predictivas.	123

Tabla 4.24.- fortalezas y debilidades del modelo del MBC.....	125
Tabla 4.25.- Información a recopilar durante la primera etapa del modelo.....	128
Tabla 4.26.- Objetivos del proceso de análisis.....	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.- Tipos de Mantenimiento.	12
Figura 2.2.- Modelo básico de criticidad.	17
Figura 2.3.- Curva de la Bañera.	24
Figura 2.4.- Ciclos de la política I.....	26
Figura 2.5.- Ciclo de la política II.....	27
Figura 2.6.- Intervalo P-F.....	33
Figura 2.7.- Límite de vida segura.	38
Figura 2.8.- Límite de vida costo-eficiente.....	38
Figura 2.9.- Modelo Costo-Riesgo-Beneficio.....	40
Figura 2.10.- Gráfico de Probabilidad de Falla- Consecuencias.....	43
Figura 2.11.- Cadena de Markov para el modelo del MBC.....	54
Figura 4.1.- Representación gráfica de los tiempos entre fallas (TEF).....	66
Figura 4.2.- Papel de Weibull.	71
Figura 4.3.- Resultados obtenidos usando el AUTOCON 1.0.....	73
Figura 4.4.- Papel de Weibull obtenido en el AUTOCON 1.0.....	74
Figura 4.5.- Intervalo PF del eje del pulverizador de una máquina moledora (modo de falla: altas vibraciones).....	88
Figura 4.6.- Costos Directos	90
Figura 4.7.- Costos Indirectos	90
Figura 4.8.- Cuantificación del Riesgo.	91
Figura 4.9.- Curva de los costos y del Riesgo.....	99
Figura 4.10.- Curva de los costos, del Riesgo y del Impacto total.	101
Figura 4.11.- Curva del Impacto total, a partir, de la suma punto a punto de la curva de costos y del riesgo.	102
Figura 4.12.- Gráfica de la función $f(\lambda_{in})$ obtenida del MAPLE 9.5.....	110
Figura 4.13.- Gráfica de la función $f(\lambda_{in})$ para $n= 2$ obtenida del MAPLE 9.5.....	115

Figura 4.14.- Jerarquización de los equipos de un planta.	130
Figura 4.15.- Política de mantenimiento basado en el fallo.....	132
Figura 4.16.- Métodos de estimación para tareas basadas en la condición.....	135
Figura 4.17.- Métodos de estimación para tareas basadas en el tiempo.	136
Figura 4.18.- Métodos de estimación basados en la relación costo/beneficio.	137
Figura 4.19.- Modelo para la estimación de la frecuencia de mantenimiento.	138
Figura 4.20. Etapas del modelo de estimación.....	139
Figura 4.21.- Esquema para implantar los indicadores de mantenimiento.	148

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Para incursionar con éxito en los mercados competitivos que caracterizan a la economía del mundo globalizado actual, existen varios factores claves que deben atender las organizaciones industriales y de servicios, como son: **la calidad** que se debe brindar a los clientes con productos y servicios que satisfagan sus necesidades, también, se debe considerar **el precio** que los consumidores estén dispuestos a pagar por estos. No obstante, lo antes indicado, conduce a otro factor clave, que es, **la productividad**. Estos factores se deben atender sin descuidar **la seguridad y medio ambiente**, que hoy en día, son de gran importancia en el escenario industrial. De igual manera, se necesita el aporte de otros factores, como son **la confiabilidad y la disponibilidad**, ya que, sino se cuenta con equipos confiables y que estén disponibles para cumplir la labor asignada no se pueden alcanzar las metas trazadas por la organización. Como consecuencia, el mantenimiento se ha convertido en una **función estratégica**, ya que, el éxito o fracaso en el logro de las metas trazadas por estas, depende que se cumplan los planes establecidos para mantener los sistemas y equipos en condiciones operativas.

Para establecer planes de mantenimiento preventivo que permitan alcanzar una intervención oportuna y efectiva de los activos, es necesario emplear herramientas eficientes para determinar la frecuencia de las labores de mantenimiento basándose en el comportamiento real de los equipos. En la actualidad, la planificación del mantenimiento se fundamenta en las frecuencias que se obtienen basándose en las recomendaciones del fabricante, la experiencia del personal que opera y mantiene los equipos y el comportamiento de equipos similares pertenecientes a otras organizaciones.

El uso de estas técnicas de estimación pudiese generar un exceso o insuficiencia en el mantenimiento, debido a que se emplean criterios y consideraciones que ni reflejan el comportamiento real ni las condiciones particulares de operación de los equipos y a su vez generan altos costos en mano de obra, repuestos y materiales. Lo antes descrito, justifica el desarrollo de un modelo para determinar las frecuencias de mantenimiento preventivo que permita la intervención oportuna y costo-eficiente de los equipos basados en sus condiciones reales de deterioro.

Este Trabajo de Investigación consta de cuatro (4) capítulos desarrollados de la siguiente manera:

En el **Capítulo 1**, se expone el planteamiento del problema donde se hace una descripción general del propósito de la investigación, en la cual se indica, cuál es el problema que existe, que se va a estudiar, cuál es la razón de la investigación, su importancia, cuales son las variables bajo estudio y los alcances de la tesis. También, se presentan los objetivos, distribuidos en un objetivo general y unos objetivos específicos. Por último, se expone la justificación de la investigación.

En el **Capítulo 2**, inicialmente, se presentan algunos antecedentes de trabajos relacionados con la temática de esta investigación, prestando especial atención en lo que se hizo, como se hizo y las conclusiones alcanzadas. Seguidamente, se exponen los fundamentos teóricos estrechamente ligados con este trabajo de investigación y donde se definen los términos básicos que facilitan el entendimiento del trabajo y se describen las variables que permitirán la solución del problema planteado.

En el **Capítulo 3**, se hace referencia a las modalidades de investigación en que estuvo enmarcado el trabajo según los objetivos planteados, también, se exponen las técnicas de investigación que fueron empleadas para el desarrollo del estudio y, por

último, se explican las distintas etapas que se llevaron a cabo en la realización de este trabajo.

En el **Capítulo 4**, se describen las metodologías de estimación consideradas en el trabajo, se analizan los aspectos tanto positivos como negativos de cada una. Posteriormente, se hace referencia al desarrollo del modelo, en esta parte, se explican las distintas etapas que lo conforman y que permitirán lograr una planificación efectiva de las actividades de mantenimiento. Finalmente, se señalan los indicadores seleccionados para evaluar la efectividad del modelo.

Finalmente, se exponen las conclusiones y recomendaciones a las cuales se llegaron con el desarrollo del trabajo y que servirán de base o contribución a posteriores trabajos relacionados con los métodos de determinación de la frecuencia de inspección o de ejecución de actividades de mantenimiento.

1.1 Planteamiento del problema

Con el firme objetivo de hacerse competitivas y no sucumbir ante las exigencias que plantea una economía globalizada, es que actualmente, las organizaciones industriales han entendido que su éxito depende de tener una visión integral del negocio, es decir, donde no sólo la producción que representa la fuente de los ingresos sea atendida, sino que también, parte de los esfuerzos y recursos sean destinados a otras funciones que, a pesar, de estar subordinadas a la producción, resultan claves dentro del proceso productivo y en el logro de las metas trazadas por las compañías. Una de estas funciones claves, es el Mantenimiento, puesto que, su objetivo es mantener la operatividad de los equipos o restablecer su funcionamiento en forma rápida y al costo más bajo posible.

Como consecuencia de esta nueva visión del Mantenimiento, es que la mayoría de las compañías concentran sus esfuerzos y recursos en la aplicación de herramientas sofisticadas, con el objeto de mejorar su rendimiento, productividad y la ganancia asociada; sin descuidar los aspectos relacionados a la seguridad, higiene industrial y medio ambiente. Un aspecto que ha generado gran atención, es el desarrollo de metodologías más eficientes para la determinación de las frecuencias de las tareas de mantenimiento, esto por, la importancia de la intervención oportuna de los activos para minimizar la aparición de fallas que pudiesen ocasionar retrasos en la producción y perjudicar al personal y al medio ambiente.

En la actualidad, las compañías emplean metodologías para determinar las frecuencias basadas en las **recomendaciones del fabricante** protegiendo la gara costa de incrementar la frecuencia de mantenimiento; **al juicio del personal** involucrado con la operación y el mantenimiento de los equipos, criterios subjetivos que difieren entre una u otra persona; por el **comportamiento de equipos similares** en otras plantas, los cuales, al operar bajo condiciones particulares y contextos diferentes presentan comportamientos distintos; por medio del **histórico de fallas**, lo cual, en la mayoría de las compañías no es posible, ya que, estas no cuentan con un registro confiable. La determinación de la frecuencia de mantenimiento, a través, de los métodos descritos pudiese traer como consecuencia, un exceso o una insuficiencia en el mantenimiento de los equipos, lo que afecta significativamente, tanto la disponibilidad como la confiabilidad de los activos físicos, ya que, poco mantenimiento conlleva al deterioro del equipo y un exceso promueve la aparición de fallas generándose altos costos y riesgos por la aparición de fallas no previstas.

Con el propósito de determinar las frecuencias del mantenimiento preventivo de forma efectiva y basándose en las condiciones operativas reales de los equipos, en el presente trabajo de investigación se propone el desarrollo de un modelo asociado a un conjunto de pasos que conduzcan a establecer dichas frecuencias. La herramienta

se fundamenta en algunas metodologías de estimación empleadas en el escenario industrial e incorporando otras técnicas estadísticas que han sido desarrolladas por expertos en el área de la ingeniería y el mantenimiento. La aplicación efectiva del modelo dependerá de la data que se cuente de los equipos y de las políticas de mantenimiento propias de cada empresa, a fin de, lograr una intervención oportuna y costo-eficiente de los activos físicos en las industrias.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo conceptual para la estimación de las frecuencias de mantenimiento preventivo basado en las metodologías de estimación más utilizadas en el escenario industrial.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Describir las diferentes técnicas empleadas en la actualidad para la estimación de las frecuencias de mantenimiento preventivo.

2. Estudiar los factores de mayor incidencia de las distintas técnicas de estimación de las frecuencias de mantenimiento preventivo dentro del escenario operacional.

3. Establecer un modelo para la estimación de las frecuencias de mantenimiento preventivo con base en las metodologías de estimación más usadas por las industrias.

4. Formular indicadores para la evaluación de la gestión de mantenimiento basados en la aplicación del modelo desarrollado.

1.3 Justificación de la investigación

En el aspecto técnico, este trabajo de investigación busca contribuir con el proceso de mejoramiento continuo de la función de mantenimiento, mediante el desarrollo de un modelo para la estimación de la frecuencia del mantenimiento preventivo, que surja como una alternativa a los métodos de estimación existentes y que se caracterice por lograr una planificación efectiva de las tareas de mantenimiento.

En el aspecto económico, el modelo planteado tiene como objetivo fundamental, lograr la intervención oportuna y costo-efectiva de los activos de una organización, con lo cual, estas puedan contar con equipos confiables que sean seguros y estén disponibles para cumplir con la labor asignada, pudiendo así, incrementar su productividad y ser competitivas al proporcionar productos y servicios de calidad, lo cual, se traduce en una mayor rentabilidad de la inversión.

En lo social, si se logra una planificación efectiva de las actividades de mantenimiento se pueden minimizar la aparición de fallas o eventos indeseados que pudiesen afectar al personal que labora en la empresa e, igualmente, al medio ambiente, lo cual, generaría un efecto perjudicial en las poblaciones aledañas a la planta.

En lo académico, el modelo desarrollado puede constituir una herramienta útil para los estudiantes de las ramas de la Ingeniería que incluyen en su pensum de estudio, el Mantenimiento. Igualmente, podría ser la base a nuevas investigaciones

que profundicen aún más sobre el tema de los métodos para determinar la frecuencia de mantenimiento.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

A continuación se presentan algunos trabajos relacionados con la temática abordada en este trabajo y que se consideran antecedentes del mismo. Así tenemos:

Maestre, R., en su Trabajo de Grado elaboró rutinas de mantenimiento para los recipientes a presión y tanques apertados más críticos de las estaciones y plantas compresoras, basándose en la aplicación de la metodología de “Inspección Basada en Riesgo”, permitiéndole precisar la mejor estrategia para las frecuencias de inspección, traducándose esto, en actividades de mantenimiento. Dicho trabajo tiene como una de sus conclusiones, que el cálculo de los parámetros de desgaste en los equipos permitió obtener las mediciones que mejor se ajustaban a la situación de cada equipo para introducirlos en la metodología de IBR. [1]

Villalba, M. y Salón M., en su Tesis de Grado hicieron una evaluación por medio de indicadores de mantenimiento y basándose en técnicas estadísticas para el diagnóstico operacional referido a fallas, y posterior aplicación de un análisis de criticidad identificar las debilidades del sistema actual de mantenimiento. Además, a través, de un modelo matemático determinaron el intervalo óptimo en el que se debería efectuar el mantenimiento preventivo. En su trabajo concluyeron que, a pesar que la política de mantenimiento para las locomotoras se enfoca hacia el mantenimiento preventivo, el que predomina es el correctivo originando elevados costos de reparación. [2]

Ríos, A., en su Tesis de Grado elaboró una propuesta de una metodología para la estimación de la frecuencia de lavado axial de turbocompresores, la cual, consistió en seleccionar variables de campo que definen la degradación del desempeño, en función del nivel de contaminación del compresor axial, desarrollar modelos de predicción basado en el ajuste estadístico de datos operacionales obtenidos por monitoreo de condiciones y aplicar técnicas de tomas de decisiones. Una de sus conclusiones que se puede destacar es que, el régimen de funcionamiento de las turbinas influye de manera directa sobre la tasa de deterioro del desempeño de las unidades turbocompresores, y por ende, sobre la amplitud del intervalo de mantenimiento. [3]

2.2 Fundamentos teóricos

2.2.1 Definición de Modelo

El término **modelo** se puede definir como un esquema o representación de carácter teórico que se emplea para analizar, describir, explicar, simular o predecir fenómenos o procesos. Con un modelo se pueden representar los aspectos lógicos de los diferentes tipos de datos existentes del sistema o realidad compleja q esta siendo analizada y permite reflejar de forma visual las interrelaciones entre esos datos. Esta representación puede ser **matemática**, en ese caso, se trata de un **modelo matemático**, el cual, se define como una representación numérica o descripción matemática de un hecho, fenómeno o situación real. [4]

2.2.2 El Mantenimiento

El mantenimiento se define como la combinación de actividades mediante las cuales un equipo o sistema se mantiene, o se restablece a, un estado en el que puede realizar las funciones para la cual fue diseñado o asignado. [5]

En la figura 2.1 se muestran los tipos de tareas de mantenimiento que se pueden aplicar a un equipo antes de la ocurrencia de una falla o cuando el activo ha fallado. La aplicación de una alguna actividad preventiva en particular dependerá de si la frecuencia de dicha acción es conocida o desconocida. En el caso, de las actividades correctivas se basa en el carácter provisional o definitivo de una reparación e, igualmente, si la reparación amerita alguna modificación o no de las características del activo.

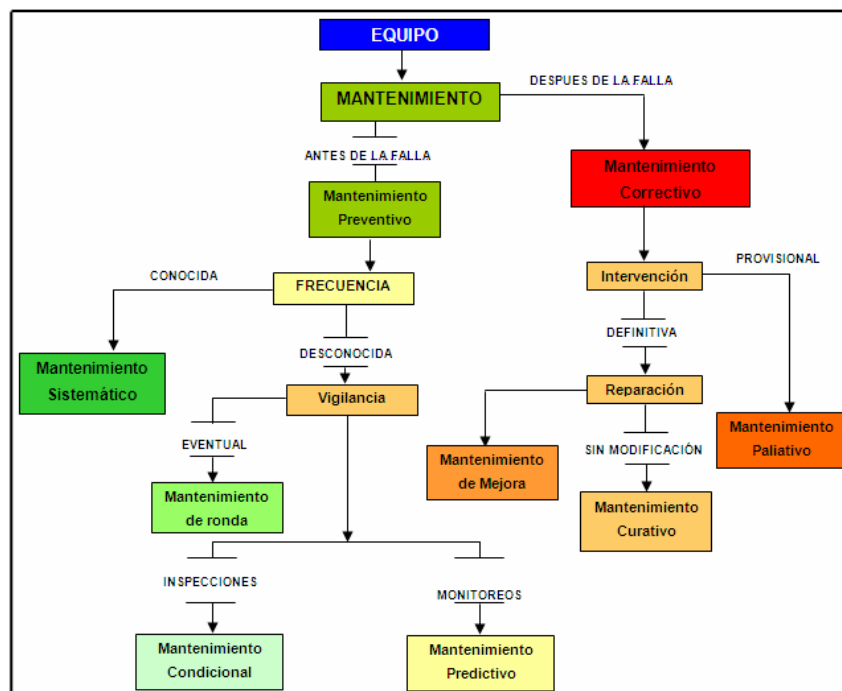


Figura. 2.1.- Tipos de Mantenimiento.

Fuente: Suárez, D., y Bravo, D., (2008)

Mantenimiento Correctivo

Se realiza después que ocurre una falla, es decir, cuando el equipo es incapaz de seguir operando o no está cumpliendo la función para cual fue diseñado o asignado. El objetivo de este tipo de mantenimiento consiste en llevar los equipos después de una falla, a sus condiciones operativas, por medio de restauración o reemplazo de componentes o partes. [6]

Dependiendo de la preparación anticipada o ejecución imprevista de la acción de correctiva, se puede dividir el mantenimiento correctivo en:

- **Mantenimiento Planificado:** consiste en una intervención correctiva planificada durante una parada programada del equipo, es decir, se conoce con antelación que es lo que debe hacerse, de modo que cuando se pare el equipo para efectuar la reparación, se disponga del personal, repuestos y documentos técnicos necesarios para realizarla correctamente. [7]

- **Mantenimiento No Planificado:** se conoce también como mantenimiento de emergencia. Consiste en la corrección de las averías o fallas cuando estas se presentan y cuyas reparaciones requieren de acciones urgentes y no planificadas para evitar consecuencias serias, como pérdida del tiempo de producción y condiciones inseguras. [7]

Adicionalmente, según el carácter temporal o definitivo de la reparación de la falla, el mantenimiento correctivo se puede clasificar en:

- **Mantenimiento Paliativo:** este tipo de mantenimiento se encarga de la reposición del funcionamiento del equipo pero sin eliminar la fuente que provocó la falla, es decir, constituye un trabajo de carácter provisional. [8]

- **Mantenimiento Curativo:** se fundamenta en la reparación de una máquina o equipo pero eliminando las causas que han producido la falla, es decir, el trabajo de restauración tiene carácter definitivo. [8]

- **Mantenimiento de Mejora:** consiste en modificaciones o agregados que se pueden hacer a los equipos, si ello constituye una ventaja técnica y/o económica, y si permite minimizar las actividades de mantenimiento. Por ejemplo, la sustitución de componentes de menor calidad por partes de mejor calidad y mayor resistencia. [8]

Mantenimiento Preventivo

Se define como una serie de tareas planeadas y programadas previamente con base en el tiempo, el uso o la condición del equipo y, que se llevan a cabo, para contrarrestar las causas conocidas de fallas potenciales, y cuyo objeto es mantener los equipos bajo condiciones específicas de operación. [6]

Según se basen el tiempo de uso o la condición del equipo, se tiene los siguientes tipos de mantenimiento preventivo:

- **Mantenimiento Sistemático:** se efectúa de acuerdo con un plan establecido en función del uso del equipo, es decir, a una frecuencia fija de mantenimiento. [6]

- **Mantenimiento Condicional:** se inicia como resultado del conocimiento de la condición de deterioro del equipo observada mediante el monitoreo de rutina o continuo. Las acciones de mantenimiento basándose en la condición de desgaste o deterioro del equipo permiten maximizar el aprovechamiento de su vida útil. [5]

- **Mantenimiento de Ronda:** este tipo de mantenimiento preventivo, consiste en un conjunto de actividades frecuentes pero de una duración limitada cuyo principal objetivo es la vigilancia regular del equipo. [8]
- **Mantenimiento Predictivo:** consiste en el monitoreo de las condiciones y el análisis del comportamiento de los equipos para predecir intervención. Este tipo de mantenimiento se basa en el hecho de que la mayoría partes de un equipo darán algún tipo de aviso antes de fallar, por lo tanto, se emplean distintos mecanismos para la detección de esos síntomas. [6]

2.2.3 Frecuencia

La frecuencia de inspección o de ejecución de mantenimiento, representa el tiempo a transcurrir entre dos inspecciones o de realización de un trabajo de mantenimiento de un mismo elemento de un equipo. [6] Estas frecuencias, en la mayoría de los casos, se determinan a razón de la experiencia y pericia del personal a cargo, consultando el registro histórico del funcionamiento del equipo, el fabricante también puede estipular el momento adecuado a través de los manuales técnicos, y en algunos casos, se consultan el historial de equipos similares. [5]

Es muy amplia la gama de frecuencias a las que se puede realizar una inspección o alguna labor de mantenimiento. Cuando se trate de equipos de operación continua, las frecuencias de mantenimiento pueden ser: diaria, semanal, mensual, trimestral, semestral, anual, entre otras. En caso de equipos de operación discontinua se usan frecuencia de tipo contador, es decir, tomando como referencia sólo las horas de uso. [6]

2.2.4 Inspección

Una inspección consiste en revisar un equipo o componente con el fin de determinar el estado en que se encuentra. Durante una inspección no se modifica o altera la situación en que se encuentra el equipo sino que solo se detecta y define. Los objetivos que se persiguen con la realización de inspecciones son los siguientes:

- Detectar anomalías incipientes para ordenar su reparación antes que causen daños mayores que paralicen a un equipo.
- Conocer el avance del deterioro de los elementos mecánicos para definir el momento más oportuno de su reemplazo, tratando de aprovechar al máximo la vida útil.

En cuanto a la forma de efectuar la inspección se consideran dos tipos: inspección rutinaria, que se efectúa con el equipo en operación, e inspección especial, que para efectuarla se necesita que el equipo este fuera de operación. [6]

2.2.5 Análisis de Criticidad

El Análisis de Criticidad es una herramienta metodología que permite jerarquizar los equipos dentro de una instalación industrial, en función de su impacto en el proceso productivo, con el objetivo de facilitar la toma de decisiones acertadas y efectivas que conduzcan a priorizar los programas y planes de mantenimiento preventivo o correctivo hacia los activos físicos que sean más importantes o, que según sea, su realidad actual se haga necesario mejorar su confiabilidad. [9]

Un modelo básico de análisis de criticidad, es equivalente al mostrado en la figura 2.2.

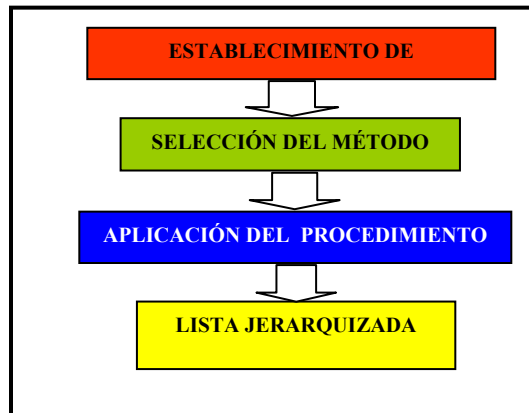


Figura 2.2.- Modelo básico de criticidad.

Fuente: Huerta M., Rosendo, (2003)

Existen distintos métodos que pueden ser aplicados para la jerarquización de los activos físicos de una planta, algunos basados en un único criterio de evaluación y otros que para la toma de decisiones consideran varios criterios de valoración. Entre las herramientas metodológicas para establecer la criticidad de los equipos, se tienen: el principio de Pareto, el método ABC, la metodología DS, la matriz de impacto-esfuerzo, la metodología ELECTRE TRI, entre otras.

2.2.6 Definición de Falla

Se define como una falla a cualquier evento o situación que impide el cumplimiento de un propósito preestablecido en un activo. [10] Las fallas de un activo pueden ser de diferentes tipos, así se tiene:

- **Por su alcance:**

- **Parcial:** es aquella que origina desviaciones en el funcionamiento de un equipo pero no la incapacidad total para cumplir su función.

➤ **Total:** es aquella que origina desviaciones o pérdidas en las características de funcionamiento de un equipo produciendo la incapacidad total para cumplir su función. [6]

▪ **Por su impacto:**

➤ **No crítica:** este tipo de falla no afecta los objetivos de producción o de servicio.

➤ **Semi- crítica:** es la falla que afecta parcialmente los objetivos de producción o de servicio.

➤ **Crítica:** es aquella que afecta totalmente los objetivos de producción o de servicio. [6]

▪ **Por su velocidad de aparición:**

➤ **Progresiva:** es aquella en la que se observa la degradación en el funcionamiento del equipo y puede ser determinada por una evaluación de las características del mismo.

➤ **Intermitente:** estas fallas se presentan alternativamente por lapsos limitados de tiempo.

➤ **Súbita:** es la falla que ocurre instantáneamente y que no puede ser prevista. [6]

Igualmente, se deben definir otros tipos de fallas consideradas en este trabajo, como son:

- **Falla funcional:** se refiere a la incapacidad de un equipo o sistema para desarrollar una función específica dentro de límites establecidos. [11]

- **Falla potencial:** es una condición relacionada a nivel de degradación específico y que puede ser definido y detectado. Si se establece que existe una condición de falla potencial y no se realiza la intervención oportuna del equipo ocurrirá una falla funcional. [11]

- **Falla suave:** ocurren debido a modos de falla relacionados con el deterioro, y se caracterizan por una degradación gradual de las condiciones del equipo, lo cual, permite su detección mediante el monitoreo continuo del activo. [12]

2.2.7 Gestión de Mantenimiento

Las actividades de mantenimiento forman un proceso cíclico de mejoramiento; se evalúa, mediante indicadores de control, posteriormente se toma una decisión y después se ejecuta la acción, para mejorarlo según los resultados obtenidos. Entonces, uno de los elementos fundamentales para llevar a cabo el mantenimiento, lo representa la gestión de mantenimiento, que representa la función ejecutiva de planificar, organizar, coordinar, dirigir y controlar cualquier actividad con responsabilidad sobre los resultados. En el control de la gestión se diferencian cuatro fases, que son:

- **Recopilación de información:** se refiere a la captura de los valores de referencia (meta) y los resultados por la ejecución de los procesos operativos que son objeto del control de gestión.

- **Comparación de los resultados:** consiste en medir el comportamiento de los equipos, a través, de los indicadores e identificar las desviaciones entre los valores de referencia (meta) y los valores reales obtenidos.

- **Análisis:** en esta fase, se interpretan los resultados de los indicadores, para determinar las causas de las desviaciones, de tal forma, que se pueden formular alternativas o acciones que permitan mejorar los resultados.

- **Toma de decisiones:** se eligen las alternativas o acciones que se consideran más apropiadas, para disminuir o eliminar las causas de las desviaciones de los valores establecidos.

Para asegurar el éxito de un sistema de mantenimiento es indispensable conocer los resultados con el fin de aplicar los correctivos necesarios que permitan obtener mejoras. Por esta razón, es necesario contar con una serie de indicadores que periódicamente muestren la situación del mantenimiento para decidir las acciones a implementarse. [13]

- **Indicadores de gestión de Mantenimiento**

Los indicadores son valores, que permiten medir y evaluar los resultados de manera objetiva mediante patrones establecidos, para verificar el cumplimiento de las metas prefijadas y facilitar que la toma de decisiones técnicas y gerenciales del mantenimiento sean éstas correctivas y/o preventivas. [13]

- **Características de un indicador de gestión de Mantenimiento**

Los indicadores de gestión se deben caracterizar por:

- **Simplicidad:** se refiere a la facilidad del indicador para medir lo que se pretende evaluar.
- **Adecuación:** El indicador debe describir por completo lo que se quiere analizar y reflejar la magnitud para determinar la desviación real.
- **Utilidad:** Es la posibilidad del indicador para estar siempre orientado a buscar las causas que han llevado a que alcance un valor particular y mejorarlas.
- **Oportunidad:** se relaciona con la capacidad para que los datos sean recolectados a tiempo. Igualmente requiere que la información sea analizada oportunamente para poder actuar. [13]

- **Selección de indicadores para la gestión de Mantenimiento**

Para definir un buen indicador de control en un proceso es importante desarrollar un criterio para la selección de los indicadores que deberán monitorearse en forma continua, ya que el seguimiento tiene un alto costo cuando no está soportado por un verdadero beneficio.

Se recomienda utilizar una técnica sencilla, que consiste en responder cuatro (4) preguntas básicas: ¿Es fácil de medir? ¿Se mide rápidamente? ¿Proporciona información relevante en pocas palabras? ¿Se grafica fácilmente? Si las respuestas a todas las preguntas anteriores son afirmativas, ya está definido un indicador apropiado. [13]

2.2.8 Metodologías para estimar la frecuencia de mantenimiento.

✚ Estimación de frecuencia basados en los históricos de fallas.

En esta técnica, la estimación de la frecuencia de las labores de mantenimiento se fundamenta en el uso del registro histórico de las fallas. En este documento debe estar registrada o asentada la información de todas las fallas ocurridas a los equipos.

Para establecer la frecuencia de intervención del equipo, primero se debe establecer un intervalo de estudio, posteriormente, identificar el número de fallas ocurridas durante ese período e, igualmente, los tiempos entre falla (TEF) respectivos. Seguidamente, con los valores de los tiempos entre fallas y el número de fallas, se procede a calcular el tiempo promedio entre falla (TMEF), el cual, representará el tiempo a transcurrir entre dos actividades de mantenimiento.

- **Tiempo entre falla (TEF):** se refiere al tiempo que es capaz de operar un equipo a la capacidad requerida sin interrupciones desde dentro del período considerado en el estudio. Iniciando el período desde la puesta en servicio del equipo hasta la aparición de una falla. [6]

- **Tiempo Promedio entre Fallas (TMEF):** indica el intervalo de tiempo más probable entre un arranque y la aparición de un fallo; es decir, es el tiempo medio transcurrido hasta la llegada del evento “fallo”. [6]

✚ Estimación de frecuencia basada en confiabilidad.

La Confiabilidad es la probabilidad de buen funcionamiento de un equipo o sistema en un intervalo de tiempo t y bajo ciertas condiciones de uso. [5]

Por esta razón, se puede asociar con la frecuencia, ya que, en este tiempo t transcurre entre dos inspecciones y a su vez, existe un valor de confiabilidad estimado. El concepto de Confiabilidad, incluye, la probabilidad, que esta asociada a un nuevo evento y a un tiempo t , la función requerida, se relaciona con las condiciones de uso y, el período de tiempo, referido a la duración de la gestión. [5]

Para la estimación de las frecuencias de mantenimiento preventivo basados en la confiabilidad del equipo se emplea la Distribución de Weibull, puesto que, esta es una técnica estadística que puede ser usada para determinar los períodos de las actividades basados en confiabilidad y que se caracteriza por su adaptabilidad a cualquier tipo de distribución probabilística. [14]

- **Distribución de Weibull.**

Para la distribución de Weibull, la confiabilidad se expresa matemáticamente como:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

β : parámetro de forma,

η : parámetro de escala,

γ : parámetro de posición. [14]

- **Significado de los parámetros β , η , y γ**

- **Parámetro de forma β**

Define en que fase de la vida se encuentra el componente o equipo (curva de la bañera). [15]

En la figura 2.3 se presenta un ejemplo de la curva de la bañera que es una gráfica donde se muestra el comportamiento de la tasa de falla durante la vida de un sistema o equipo.

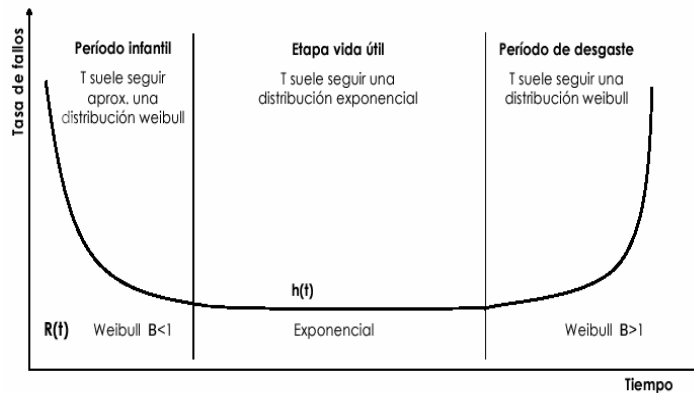


Figura 2.3.- Curva de la Bañera.

Fuente: Quijano, J., (2004)

Casos:

$\beta < 1$ Mortalidad Infantil, $\lambda(t)$ decrece.

$\beta = 1$ Operación Normal, $\lambda(t)$ es constante.

$\beta > 1$ Envejecimiento, $\lambda(t)$ crece. [6]

▪ Parámetro de escala η

Este parámetro ayuda a definir la vida característica de un equipo, la cual, queda expresada como se muestra en la ecuación 2.2.

$$\text{Vida característica: } \eta \pm \gamma \quad (\text{Ec. 2.2})$$

La vida característica es el punto, en el cual, un equipo alcanza una confiabilidad del 36, 8% apoyados en el punto de Weibull, es decir, existe un 63,2% de probabilidad que el equipo falle. [6]

- **Parámetro de posición γ**

Define si la nube de puntos $(F(i),t)$ en la gráfica de Weibull se ajusta a una recta. Los casos posibles son:

- Si es posible ajustar la nube de puntos a una recta, entonces $\gamma = 0$.
- Si la nube de puntos, resulta una curva, el valor de $\gamma \neq 0$. [6]

- ✚ **Modelos matemáticos para políticas ideales de mantenimiento**

Estos modelos definen dos políticas de mantenimiento preventivo propuestas por Barlow y Hunter para equipos que están sujetos a fallas que ocurren al azar o de forma aleatoria. Estas son políticas basadas en la edad y en el reemplazo a intervalos constantes, las cuales se conocen, respectivamente, como políticas tipo I y tipo II. A continuación, se formulan los modelos matemáticos para determinar el período o intervalo de tiempo del mantenimiento que minimice el costo total esperado. [5]

- **Reemplazo preventivo ideal basado en la edad (política tipo I)**

Una política tipo I consiste en llevar a cabo un reemplazo preventivo después que el equipo haya estado operando de forma continua y sin falla durante un período de tiempo, t_p (t_p puede ser finito o infinito); en caso de que t_p resultase infinito, es decir, un período de tiempo muy grande, no se programa ningún actividad preventiva, en cambio, si el equipo falla antes que haya transcurrido el tiempo hasta el próximo mantenimiento programado, se efectúa el mantenimiento en el momento de la falla y se reprograma el mantenimiento preventivo, el cual, se debe efectuar después de t_p horas de operación. [5] Esta política se ilustra en la figura 2.4.

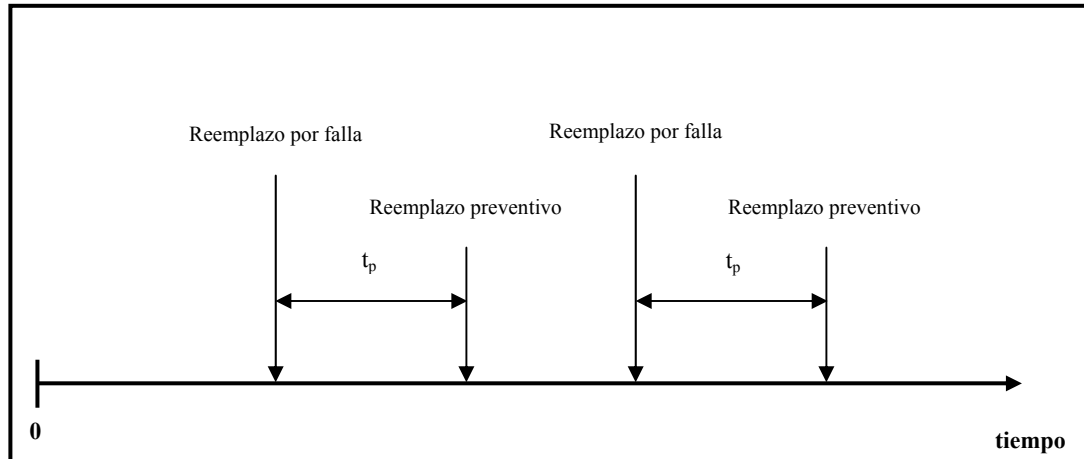


Figura 2.4.- Ciclos de la política I.

Fuente: Duffuaa, S., A. Raouff y J. Campbell , (2007).

El modelo determina el t_p que reduce al mínimo el costo total esperado del mantenimiento preventivo y del correctivo por unidad de tiempo de la siguiente manera:

$$UEC(t_p) = \frac{C_p R(t_p) + C_f [1 - R(t_p)]}{t_p R(t_p) + M(t_p) [1 - R(t_p)]} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Donde:

$UEC(t_p)$: Costo esperado por unidad de tiempo.

t_p : es el intervalo de tiempo que el equipo opera sin fallas.

C_p : es el costo de mantenimiento preventivo.

$R(t_p)$: confiabilidad o función de sobrevivencia.

C_f : costo del mantenimiento correctivo

$M(t_p)$: es la media de la distribución truncada en t_p , que a su vez se define como:

$$M(t_p) = \frac{\int_{-\infty}^{t_p} t f(t) dt}{1 - R(t_p)} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Donde:

$f(t)$: es la función de densidad de probabilidad de tiempo hasta la falla.

El objetivo de este modelo es determinar el t_p que corresponde al tiempo para llevar a cabo un reemplazo preventivo y que reduce al mínimo el costo total esperado del mantenimiento por unidad de tiempo. Dado que, $UEC(t_p)$ es una función de una sola variable, a saber, t_p ; para encontrar el valor de t_p , se puede utilizar un método de búsqueda directa como el **método de la sección dorada**. [5]

- **Reemplazo preventivo ideal a intervalos constantes (política II)**

Esta política consiste en efectuar un mantenimiento preventivo al equipo después de que haya estado operando un total de t_p horas, independientemente del número de fallas intermedias. En caso de que ocurra una falla antes de t_p horas, se efectúa una reparación mínima. Esta política es apropiada para equipos complejos, como motores y turbinas. [5] En la figura 2.5 se muestra el ciclo de la política II.

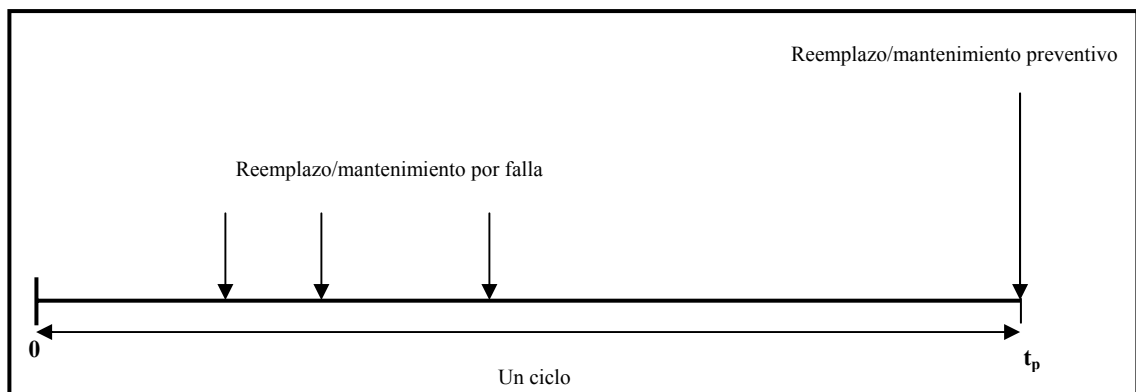


Figura 2.5.- Ciclo de la política II.

Fuente: Duffuaa, S., A. Raouff y J. Campbell, (2007).

En esta política, el costo esperado por unidad de tiempo viene dado por la ecuación:

$$UEC(t_p) = \frac{C_p + C_f H(t_p)}{t_p} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde:

$UEC(t_p)$: Costo esperado por unidad de tiempo.

t_p : tiempo de operación del equipo sin falla después de las cuales se efectúa un mantenimiento preventivo.

C_p : es el costo de mantenimiento preventivo.

C_f : costo del mantenimiento correctivo

$H(t_p)$: es el número de fallas en el intervalo t_p y viene dado por la siguiente ecuación:

$$H(t_p) = \int_0^{t_p} r(t) dt \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Donde:

$r(t)$: es la función de la tasa de fallas.

El objetivo del modelo es determinar el t_p que minimice el costo esperado por unidad de tiempo del mantenimiento preventivo y de las reparaciones. Al igual, que en la política I, en este caso, $UEC(t_p)$ sigue siendo una función de una sola variable, que es, t_p ; entonces, para encontrar el valor de t_p , también, se puede utilizar el **método de la sección dorada**. [5]

Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC) es un proceso analítico y sistemático empleado para determinar las estrategias apropiadas para minimizar la

ocurrencia de las fallas, incluyendo los requerimientos del Mantenimiento Preventivo (MP) y acciones correctivas a fin de asegurar la operación segura y costo-efectiva. La metodología del MCC propone un procedimiento que permite identificar las necesidades reales de mantenimiento, a partir, del análisis de las siguientes preguntas:

a) ¿Cuál es la función del activo?

El primer paso en el proceso de análisis del MCC consiste en definir la función o funciones de los equipos seleccionados. La función de un activo se refiere al propósito previsto del según lo descrito por un estándar del funcionamiento requerido.

b) ¿De que manera pueden fallar?

Por cada función descrita de un activo debe haber, al menos, un mecanismo o modo de falla funcional, por tanto, durante el proceso de análisis se deben identificar cada uno de ellos.

c) ¿Qué origina cada falla funcional?

Definidos los modos de fallas se debe, seguidamente, establecer los mecanismos de degradación que originan o dan lugar a un modo de falla dado.

d) ¿Qué pasa cuando cada falla ocurre?

De igual manera, es necesario que durante el análisis se identifiquen los efectos que pudiesen ocasionar una falla funcional en la seguridad, el medio ambiente y el rendimiento de la planta.

e) ¿Importa si falla?

Si la falla de un equipo tiene efectos intolerables para la seguridad, el medio ambiente y el rendimiento de la planta, el mismo se debe definir como un componente crítico. Por lo tanto, se debe establecer la criticidad de los equipos en función de las consecuencias generadas al ocurrir una falla y así, definir si la falla de un equipo dado es importante o no.

f) ¿Qué se puede hacer para predecir o prevenir cada falla?

Haciendo énfasis en que todas las fallas son malas y deben ser prevenidas. El análisis del MCC centra su atención en las actividades de mantenimiento que mayor impacto tienen en el rendimiento de los activos. Para el manejo de las fallas, se deben establecer **tareas proactivas**, las cuales, tienen lugar antes que la falla ocurre, es decir, están destinadas a prevenir que el activo falle.

g) ¿Qué pasa si no se puede prevenir la falla?

Cuando no es posible identificar una tarea proactiva eficaz para el manejo de las fallas, se deben realizar acciones por defecto que incluyen: rediseño, tareas de búsqueda de fallas y dejar funcionar hasta fallar (mantenimiento no programado). Este tipo de acciones se llevan a cabo una vez que el activo ha fallado. **[16]**

Para darle respuestas a estas preguntas se utilizan dos herramientas fundamentales:

- **Análisis de los modos y efectos de fallas (AMEF):** es una herramienta que permite identificar las causas que originan las fallas y sus efectos y consecuencias

asociadas. A partir de esta técnica se obtienen las respuestas a las preguntas a, b, c, d y e.

- **Árbol lógico de decisión:** es una herramienta que permite seleccionar el tipo de mantenimiento que se debe aplicar según la filosofía del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC). Por medio de esta técnica se obtiene las respuestas de las preguntas f y g. [17]

✚ **Estimación de la frecuencia basados en el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)**

✚ **Determinación del intervalo de tarea en condición.**

Una tarea en condición es una periódica o continua inspección diseñada para detectar una condición de falla potencial y que permite actuar antes de una falla funcional. La selección del método para determinar los intervalos de dichas tareas dependerá de las consecuencias relacionadas con el modo o los modos de falla considerados. [11]

A. Para modos de fallas con consecuencias relacionadas a la seguridad y el medio ambiente.

Tradicionalmente, se ha considerado que los intervalos ideales de inspección se definen como la mitad del intervalo PF; sin embargo, la metodología del MCC considera que los intervalos de tareas de inspección como una fracción del intervalo PF. Esta fracción dependerá de las consecuencias y la efectividad de la tarea en condición propuesta en la detección de la condición de falla potencial.

El intervalo de tarea en condición se establece usando como base una probabilidad de falla aceptable con la finalidad de minimizar la posibilidad de que ocurra un modo de falla dado, debido a la severidad de los efectos de este. Matemáticamente, el intervalo de la tarea en condición o intervalo de inspección es:

$$I = \frac{PF}{n} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Donde:

I : intervalo de inspección;

PF : intervalo entre la falla potencial y la falla funcional;

n : número de inspecciones en el intervalo PF.

En algunos casos, la ecuación 2.7 requerirá de ajustes debido a la operación continua de un equipo, es decir, la inspección se efectúa mientras el equipo está operando, o la incapacidad de tomar acciones correctivas inmediatamente al reconocimiento de una falla potencial. En estos casos, se debe destinar un tiempo para la puesta fuera de servicio del equipo antes de tener la capacidad de reparar la falla potencial. Este tiempo será referido como el **tiempo para reparar** o el **tiempo de prorroga** (T_c); y la ecuación es modificada a:

$$I = \frac{(PF - T_c)}{n} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

La ecuación 2.8 debe ser empleada, únicamente, cuando luego de ser detectada una condición de falla potencial se continuará con la operación del equipo.

Asignando valores a la probabilidad aceptable de falla según la severidad de los efectos del modo de falla bajo estudio y a la probabilidad de detectar una condición de falla potencial con la aplicación de una tarea en condición propuesta se puede determinar n con la ecuación 2.9:

$$n = \frac{\ln(P_{acc})}{\ln(1 - \theta)} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Donde:

θ : probabilidad de detectar una falla potencial con la aplicación de una tarea en condición propuesta, asumiendo que existe la falla potencial;

P_{acc} : probabilidad de falla aceptable. [11]

- **Intervalo P-F:** es el intervalo existente entre la falla potencial y la falla funcional. El método para determinar este intervalo depende de la naturaleza del modo de falla, ya que, este tiene diferentes características de degradación, que pueden usarse para revelar la falla. Al seleccionar la característica a ser usada como indicador de falla, se debe considerar el tamaño del intervalo PF y la disponibilidad de equipos de detección de la condición de falla potencial. En la figura 2.6 se muestra el Intervalo P-F. [11]

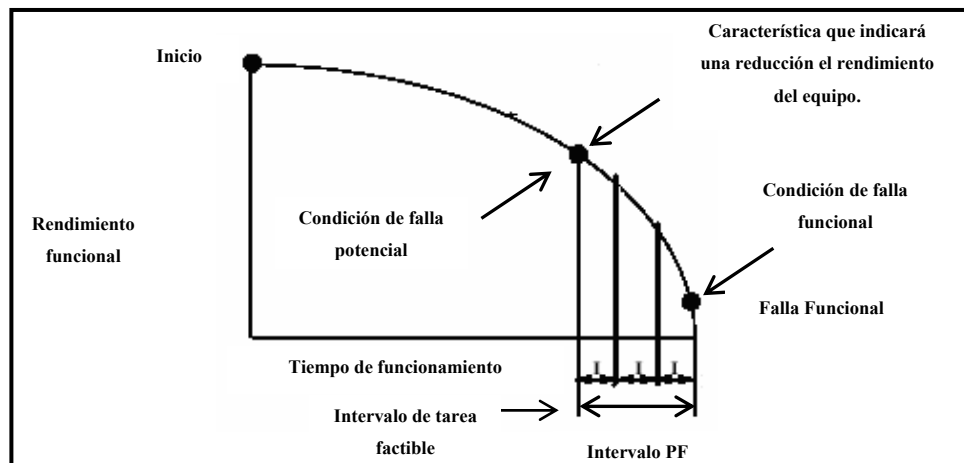


Figura. 2.6.- Intervalo P-F.

Fuente: NAVAIR, (2003)

Establecer el **límite superior** del intervalo PF, dependerá de los mecanismos de diagnóstico que estén disponibles y, los cuales, deben ser consistente con la condición de falla potencial que se desea detectar. Si el dispositivo o mecanismo seleccionado

permite una detección temprana de la condición de falla potencial, entonces, se maximizará el tamaño del intervalo. Definiendo esta condición más lejos en la curva de degradación y más cercana a la condición de falla funcional, se permitirá que el equipo se mantenga más tiempo en servicio pero requerirá de inspecciones más frecuentes.

Al definir el **límite inferior** del intervalo PF (donde se establece la condición de falla funcional) resulta esencial establecer durante el análisis de los modos y efectos de falla, la condición funcional para cada modo de falla en específico. Si el límite inferior para el intervalo PF correspondiente a un dispositivo de detección dado no puede ser determinado, o si el intervalo es muy pequeño para su aplicación práctica, se recomienda cambiar dicho dispositivo por un mecanismo de detección diferente, puesto que, este podría ser capaz de detectar la falla potencial en el punto más temprano en la curva de degradación y así se tendría un intervalo mayor. [11]

- **Métodos para estimar el Intervalo PF**

Varios métodos pueden ser usados para estimar los intervalos PF, incluyendo la opinión de los ingenieros, el aporte del personal de mantenimiento y operaciones, las pruebas y data de ingeniería, propiedades de los materiales y los métodos estadísticos usando la data de mantenimiento y operaciones.

Otro método usa como referencia un intervalo de tarea en condición existente, tomando en cuenta, que dicha tarea es efectiva en la detección de las condiciones de fallas potenciales. Si una tarea existente es efectiva para hallar fallas potenciales y en prevenir fallas funcionales, podría ser razonable concluir que el intervalo PF es significativamente mayor que el intervalo de inspección actual. Entonces,

- Si se espera que el **intervalo PF** sea más largo que el intervalo de inspección existente, PF puede ser estimado usando la ecuación 2.10:

$$PF = \left(\frac{\ln(1 - \alpha)}{\ln(1 - \theta)} \right) * I \quad (\text{Ec. 2.10})$$

- Cuando se espera que el **intervalo PF** sea más pequeño que el intervalo de inspección existente, la expresión matemática correspondiente es la ecuación 2.11:

$$PF = \left(\frac{\alpha}{\theta} \right) * I \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Donde:

α : efectividad de la tarea (número de fallas potenciales halladas dividido por el total de fallas (potenciales y funcionales)).

θ : probabilidad de detectar una falla potencial con la ocurrencia de una Tarea en Condición propuesta, asumiendo que existe la falla potencial;

I : intervalo actual de tarea.

El PF resultante deberá ser evaluado empleando para ello, el juicio de los ingenieros, la opinión del personal de mantenimiento y operaciones y cualquier otra fuente de información que permita asegurar que dicho intervalo es consistente con el modo de falla bajo consideración. [11]

B. Para modos de fallas con consecuencias operacionales y económicas.

Otro método para determinar el número de inspecciones, n , en el intervalo PF usa el siguiente modelo matemático, que es:

$$n = \frac{\ln \left[\frac{-\frac{TMEF}{PF} C_i}{(C_{npm} - C_{pf})(1 - \theta)} \right]}{\ln(1 - \theta)} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Donde:

TMEF: tiempo promedio entre fallas.

PF: intervalo entre la falla potencial y la falla funcional;

C_i. costo de una tarea de mantenimiento preventivo y viene dado por:

$$C_i = (\text{H-H}^* \text{ por inspección}) * (\text{Costo del trabajo por hora}) + (\text{Costos de consumibles}) \quad (\text{Ec. 2.13})$$

C_{pf}: costo de corregir una falla potencial, el cual, se determina como sigue:

$$C_{pf} = (\text{H-H}^* \text{ por corregir una falla potencial}) * (\text{Costo del trabajo por hora}) + (\text{Costos de Materiales y Repuestos}) \quad (\text{Ec. 2.14})$$

C_{npm}: costo de no hacer mantenimiento preventivo.

$$C_{npm} = C_{cm} + C_{opc} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Si *C_{npm}* es igual a *C_{pf}* no hay beneficio en descubrir la falla potencial antes de la falla funcional.

***H-H: Horas-Hombre**

C_{cm}: costo de mantenimiento correctivo y se calcula de la siguiente forma:

$$C_{cm} = (\text{H-H}^* \text{ por la reparación}) * (\text{Costo del trabajo por hora}) + (\text{Costos de Materiales y Repuestos}) \quad (\text{Ec. 2.16})$$

C_{opc} : costos debido al impacto operacional (si es establecido).

Un método para cuantificar este impacto es dividir las horas fuera de servicio no programadas entre las horas totales programadas disponibles.

θ : probabilidad de detectar una falla potencial con una Tarea en Condición propuesta, asumiendo que existe la falla potencial. [11]

Determinación del intervalo de tarea en tiempo límite.

Se define como tarea en tiempo límite a la puesta fuera de servicio programada de un activo o una acción correctiva en un momento límite de la vida útil del mismo para prevenir la ocurrencia de una falla funcional. Este tipo de tarea, resulta apropiada cuando los equipos exhiben características de desgaste con la edad o cuando no es conveniente aplicar una tarea en condición debido a que se tiene un intervalo PF demasiado largo. Los intervalos de este tipo de tarea están basados en el desgaste o la edad del activo. Para establecer los intervalos de tarea límite se debe tomar en cuenta, lo siguiente:

➤ Si los activos tienen modos de falla, únicamente, con consecuencias a la seguridad y el medio ambiente, el intervalo de tarea se establecerá, de acuerdo, a un límite de vida segura. Este límite o frontera se establece para asegurar que dentro de este intervalo de tiempo, el equipo o componente funcione sin fallas. Esto se ilustra en la figura 2.7.

***H-H: Horas-Hombre**



Figura 2.7.- Límite de vida segura.

Fuente: NAVAIR, (2003)

➤ Si los equipos poseen modos de falla con, sólo consecuencias económicas y operacionales, el intervalo de tarea se establecerá en un límite de vida costo-eficiente. Este límite se define, de forma intencional, para aprovechar al máximo la vida útil de los activos. Esto se muestra en la figura 2.8.

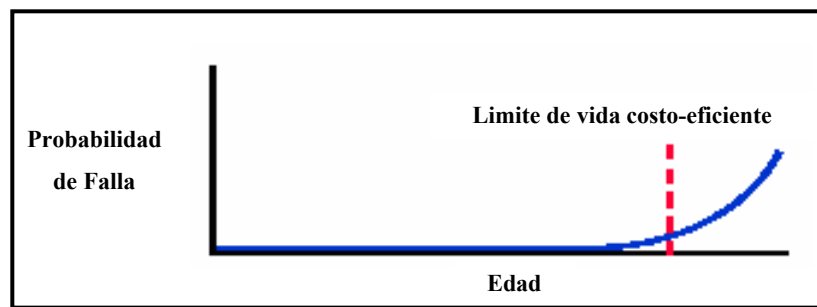


Figura 2.8.- Límite de vida costo-eficiente.

Fuente: NAVAIR, (2003)

Los intervalos de las tareas de tiempo límite se pueden establecer basándose en las recomendaciones del fabricante, el juicio de los expertos basados en la data disponible, usando la información suministrada por los operadores y mantenedores, y por el comportamiento de componentes similares en aplicaciones análogas.

Igualmente, podrán ser definidos empleando los intervalos de tareas de mantenimiento existentes y que resultan efectivas, mediante el análisis de Weibull, el

cual, permite seleccionar el tiempo, en el cual, la ocurrencia de un modo de falla dado alcanza un nivel inaceptable, a partir de ensayos, que es una forma de establecer el límite de vida segura para un activo, y con un análisis de fatiga, que se puede emplear para determinar la vida útil de una activo luego de iniciarse una grieta.

Definido el intervalo de tarea en tiempo límite, mediante la ecuación 2.17 se puede definir si el intervalo propuesto resulta costo-eficiente para el manejo de las fallas.

$$CBR = \frac{\frac{(C_{BF} * N_S) + (C_{AF} * (1 - N_S))}{N_S * t + [(1 - N_S)TMPF_p]}}{\frac{C_{AF}}{TMEF}} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

Donde:

CBR : tasa o índice de costo-beneficio

C_{BF} : costo de revisión/reemplazo antes de la falla.

N_S : el porcentaje de activos que sobreviven al intervalo de tarea propuesto.

t : intervalo de tarea propuesto.

C_{AF} : costo de reparación/reemplazo y daño colateral (si hay) después de la falla (si el impacto operacional ha sido convertido a costos debe ser incluido).

$TMEF$: tiempo promedio entre fallas (sin tarea preventivas en sitio)

$TMPF_p$: tiempo promedio de falla de los activos que fallan antes del intervalo de tarea propuesto.

Las tareas que tienen CBR menor a 1 son consideradas costo-efectivas. [11]

Metodología de Análisis de Costo-Riesgo-Beneficio (ACRB)

Esta metodología permite modelar y analizar distintos escenarios, con el fin de determinar el momento oportuno para realizar una actividad (mantenimiento,

inspección, reemplazo, servicio, entre otros). Este tipo de análisis se basa en una combinación entre los costos asociados al realizar una actividad y los beneficios esperados que dichos aspectos generan, considerando el riesgo que involucra la realización o no de tal actividad o inversión, incluyendo en la misma el hecho de disponer o no de los recursos para esta. [18] En la figura 2.9 se muestra un ejemplo gráfico de esta técnica.

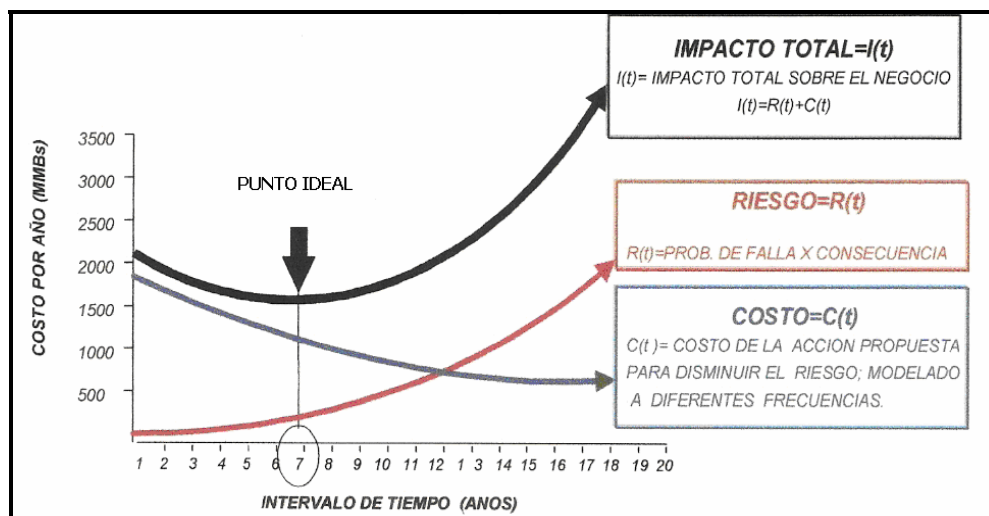


Figura 2.9.- Modelo Costo-Riesgo-Beneficio.

Fuente: Yañez, M., Perdomo J y Gómez, H., (2004)

- La curva del nivel de riesgo asociado a diferentes periodos de tiempo o frecuencias de mantenimiento.
- La curva de los costos de mantenimiento, en la cual se simulan los costos de diferentes frecuencias para la acción de mantenimiento propuesta.
- La curva de impacto total, que resulta de la suma del valor de la curva de riesgos con su valor correspondiente en la curva de los costos de mantenimiento (suma punto a punto). El “mínimo” de esta curva, representa la frecuencia para la cual la suma de los costos de la política de mantenimiento con el nivel de riesgo

asociado a esta política son mínimos; es decir hay el “mínimo impacto posible en el negocio”. Este mínimo esta ubicado sobre el valor que puede traducirse como el periodo o frecuencia ideal para la realización de la actividad de mantenimiento. Un desplazamiento hacia la derecha de este punto implicaría “asumir mucho riesgo” y un desplazamiento hacia la izquierda del mismo implicaría “gastar mucho dinero”. [18]

- **Relación Costo-Riesgo-Beneficio**

Para prevenir la ocurrencia de una falla es necesario la aplicación de algún tipo de mantenimiento, lo cual, se logra a través de un plan o programa que implique la mejor frecuencia, minimizando la ocurrencia de un evento no deseado o mitigando las consecuencias de estos. El mayor de los problemas esta en relacionar, cuánto se obtiene de lo que se gasta en el mantenimiento de los equipos y los beneficios que se obtiene de dicha inversión.

Si en la toma de las decisiones, las respuestas a las siguientes preguntas: ¿Qué se debe hacer?, ¿Cuándo?, ¿Cómo? ¿Cuáles políticas de mantenimiento son viables? ¿Y cuales son las adecuadas?, no están bien fundamentadas, se puede ocasionar un bajo o excesivo mantenimiento de los equipos, ocasionando un aumento de los costos de producción o un aumento en la tasa de fallas de estos. [18]

- **Costos de Mantenimiento**

Básicamente, los costos de la actividad de mantenimiento están conformados por los costos que implican los siguientes aspectos o factores, según sean requeridos para la actividad, así se tiene: mano de obra, materiales, transporte y gastos generales. [18]

- **Costos del riesgo o penalizaciones**

Abarcan cualquier beneficio que se deja de percibir y/o pérdida por el riesgo de ocurrir un evento no deseado, mientras se realiza el mantenimiento para restaurar la condición deseada. Entre los costos que implican para la empresa están, por ejemplo, costos de pérdida de producción, de calidad, de servicio, implicaciones legales, entre otros. [18]

- **Pérdidas por no realizar mantenimiento**

Los efectos o consecuencias que se pueden presentar si se obvia las políticas y actividades de mantenimiento, pueden ser: fallos en los equipos, paradas de plantas o equipos, defectos en los procesos, etc. Todos estos generan pérdida de dinero e impactos que pudieran afectar a la seguridad, al ambiente y la imagen de la empresa. [18]

- **Impacto total en el negocio**

El impacto de alguna política de mantenimiento, es factor determinante en la toma de decisiones y definición de estrategias orientadas a minimizar los costos de producción o maximizar las ganancias. Cuando se hace un análisis de costo-riesgo-beneficio, lo que se busca es comparar de forma cuantitativa, si las consecuencias o pérdidas por un evento posible exceden los costos de realizar una tarea de mitigación para evitar dicho evento. [18]

- **El Riesgo, R (t).**

El Riesgo se puede definir como la probabilidad de que un peligro asociado a una actividad dada, ocasione un incidente con consecuencias factibles de ser

estimadas. Igualmente, el riesgo como base fundamental del ACRB, se define como egresos o pérdidas probables como consecuencia de la posible ocurrencia de un evento no deseado, y comúnmente se expresa en unidades monetarias. Matemáticamente, el riesgo se puede calcular con la ecuación 2.18, tal como se muestra a continuación:

$$\text{Riesgo (t)} = \text{Probabilidad de Falla (t)} \times \text{Consecuencias} \quad (\text{Ec. 2.18})$$

Igualmente, se puede determinar mediante la ecuación 2.19:

$$\text{Riesgo (t)} = \text{Frecuencia de Falla (t)} \times \text{Consecuencias} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

El análisis de las ecuaciones 2.18 y 2.19 permite entender la capacidad del riesgo como indicador para el diagnóstico y la toma de decisiones, debido a que combina probabilidades o frecuencias de fallas con consecuencias. [18] La figura 2.10 refleja gráficamente lo expresado anteriormente.

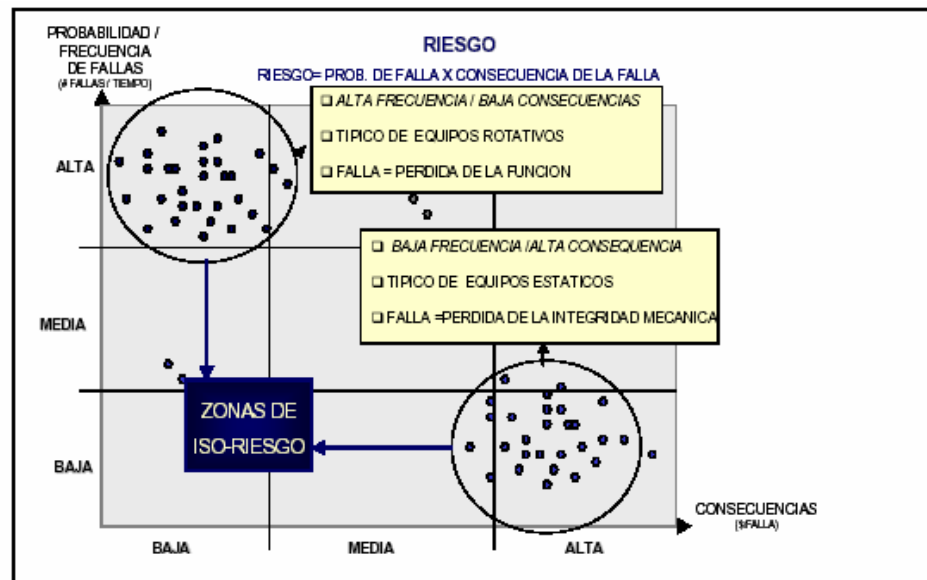


Figura 2.10.- Gráfico de Probabilidad de Falla- Consecuencias.

Fuente: Yañez, M., Perdomo J y Gómez, H., (2004)

- **Cuantificación del riesgo**

Para establecer el riesgo generado por la ocurrencia de una falla o evento no deseado durante una actividad determinada se deben calcular tanto la frecuencia o probabilidad de falla como sus consecuencias.

- **Probabilidad de Falla**

Se define como la posibilidad de que ocurra un modo de falla dado durante un intervalo de tiempo definido. Para calcular dicha probabilidad se pueden utilizar los siguientes métodos:

- Enfoque analítico: consiste en estimar la probabilidad de falla utilizando modelos matemáticos y/o datos estadísticos para los procesos de degradación.

- Basado en juicios de expertos: un equipo de expertos compuesto por personal clave de la planta con conocimientos en los equipos evalúan las probabilidades de falla.

En la mayoría de los casos, se utiliza una combinación de ambos métodos. [15]

- **Frecuencia de Falla**

Esta frecuencia esta relacionada con el número de fallas asociadas a un modo de falla dado y que ocurren durante un tiempo determinado. La frecuencia de falla de un componente en particular puede ser deducida a partir de información histórica y si es posible, soportada por juicios de expertos. [15]

- **Consecuencias de la Falla**

Las consecuencias de una falla se pueden dividir en diferentes categorías según, los criterios que se utilicen para definir las, entre algunas de estas consecuencias se tiene:

➤ **Consecuencias en la seguridad:** cuando la falla provoca una pérdida de funcionalidad u otra circunstancia que puede herir o causar la muerte de alguna persona.

➤ **Consecuencias en la salud:** representan los efectos que un evento provocaría en la salud de las personas a largo plazo.

➤ **Consecuencias medioambientales:** se refieren a los efectos que podría tener una falla sobre el medio ambiente, es decir, las consecuencias ecológicas locales o globales.

➤ **Consecuencias económicas:** se relaciona a los costos directos o indirectos que ocasiona el fallo y que se traducen en un impacto económico a la empresa.

➤ **Consecuencias operacionales:** son aquellas que afectan la producción, por lo que repercuten considerablemente en la organización (calidad del producto, capacidad, servicio al cliente o costos industriales además de los costos de reparación).

➤ **Consecuencias no operacionales:** son aquellas ocasionadas por cierta clase de fallos que no generan efectos sobre la producción ni la seguridad, por lo que el único gasto presente es el de la reparación.

➤ **Consecuencia de fallos no evidentes:** Son aquellos fallos que no tienen un impacto directo, pero que pueden originar otros fallos con mayores consecuencias a la organización. Por lo general este tipo de fallas es generada por dispositivos de protección, los cuales no poseen seguridad inherente.

La valoración de las consecuencias de una falla tiene como objetivo principal evaluar el impacto de una falla. El análisis de estas consecuencias se puede basar en modelos físicos, métodos estadísticos, valoración experta o una combinación de todas. [15]

✚ **Estimación de la frecuencia de inspección de Mantenimiento Predictivo**

Otra forma para determinar la frecuencia de las inspecciones predictivas se presenta a continuación y consiste en un modelo matemático que pretende dar una idea cercana del valor del tiempo entre inspecciones predictivas. El valor del intervalo entre inspecciones predictivas será directamente proporcional a tres factores: el factor de costo (C), el factor de falla (F) y el factor de ajuste (A). Así, la relación matemática estará definida como:

$$I = C * F * A \quad (\text{Ec. 2.20})$$

Es de hacer notar que I vendrá expresada en años por inspección.

- **Factor de Costo**

Se define como factor de costo, el costo de una inspección predictiva dividido entre el costo en que se incurre por no detectar la falla. La relación del factor de costo es la siguiente:

$$C = \frac{C_i}{C_f} \quad (\text{Ec. 2.21})$$

Donde:

C_i : es el costo de una inspección predictiva (en unidades monetarias),

C_f : es el costo en que se incurre por no detectar la falla (en unidades monetarias).

- **Factor de Falla**

Se define como factor de falla la cantidad de fallas que pueden detectarse con la inspección predictiva dividida entre la rata de fallas. La relación del factor de falla es la siguiente:

$$F = \frac{F_i}{\lambda} \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Donde:

F_i : es la cantidad de modos de falla que pueden ser detectados utilizando la tecnología predictiva (expresada en fallas por inspección),

λ : es la rata de fallas presentada por el equipo, y que además, podrían ser detectadas por la tecnología predictiva a ser aplicada (expresada en fallas por año).

- **Factor de Ajuste**

El factor de ajuste está basado en la probabilidad de ocurrencia de una o más fallas en un año utilizando la distribución acumulativa de Poisson con media igual a λ (rata de fallas expresada como fallas por año). El factor de ajuste será igual a:

$$A = -\ln(1 - e^{-\lambda}) \quad (\text{Ec. 2.23})$$

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, el intervalo de inspecciones predictivas queda definido como:

$$I = -\frac{C_i * F_i}{C_f * \lambda} \ln(1 - e^{-\lambda}) \quad (\text{Ec. 2.24})$$

Expresado en años por inspección. Siendo el inverso de esta relación igual a la frecuencia de inspección (f), la misma estará expresada en inspecciones por año. [19]

✚ CADENAS DE MARKOV APLICADAS AL MANTENIMIENTO

Una cadena de Markov, es una serie de eventos en la cual la probabilidad de que ocurra un evento depende del evento inmediato anterior. En matemáticas, se define como un proceso estocástico discreto, es decir, si se conoce la historia del equipo hasta su instante actual, su estado presente resume toda la información relevante para describir en probabilidad su estado futuro. [20]

Empleando las Cadenas de Markov, se presenta una metodología basada en la realización de inspecciones periódicas para conocer el grado de deterioro del equipo, y que según sea, el estado de degradación del mismo, alguna o ninguna acción es llevada a cabo. En este método permite realizar la programación de inspecciones y acciones, mediante el cálculo de ciertos parámetros de mantenimiento que permiten monitorear la disponibilidad. Para determinar la frecuencia, esta herramienta basada en cadenas de Markov se apoya en un modelo de mantenimiento basado en condición (MBC), el cual, se explica a continuación.

✚ Mantenimiento basado en condición (MBC)

Este basado en la detección temprana de las causas o los síntomas de una falla, que esta falla puede ser manejada costo-efectivamente antes de su ocurrencia. Las acciones del MBC son realizadas basadas en la condición actual del equipo.

Las decisiones del MBC pueden incluir un amplio rango de acciones, tales como:

1. Ajustes al equipo.
2. Reemplazo de componentes dañados o con daño potencial.
3. Reemplazo de componentes desechables
4. Ejecución de una puesta a punto que ayuda a restaurar el equipo a la condición de tan bueno como nuevo.

Algunas ventajas del MBC son:

1. Reducción en el costo total del programa de mantenimiento.
2. Evasión de suspensiones muy perjudiciales de la operación de equipo.
3. Reducción de costosas actividades del Mantenimiento Preventivo, ya que, las actividades de mantenimiento sólo se llevan a cabo de ser necesario, es decir, cuando el monitoreo de las condiciones del activo revela que existe una degradación que excede los límites considerados aceptables.
4. Se aprovecha al máximo la vida útil de los componentes.

El MBC, no sólo, reduce la cantidad de mantenimiento realizado sino también minimiza la aparición de fallas inducidas por la misma acción. [12]

Modelo de MBC usando Cadenas de Markov

A continuación, se presenta un modelo de Mantenimiento Basado en Condición (MBC) desarrollado para identificar la condición de deterioro de un equipo mediante inspecciones periódicas, y de esta forma, basado en el grado de deterioro (condición del equipo) revelado durante la inspección, llevar a cabo alguna actividad mantenimiento o no ejecutar ninguna acción.

Por tanto, inicialmente, se debe definir una escala de degradación porcentual como se muestra en la tabla 2.1 y, mediante la cual, de acuerdo a los datos obtenidos, a través, de las inspecciones del estado actual del equipo, establecer un valor o nivel máximo de deterioro que al ser alcanzado, alguna acción de mantenimiento debe ser ejecutada para retornar el equipo a operación. En el caso contrario, que el monitoreo de las condiciones del equipo revele un nivel de degradación menor al valor máximo permitido, ninguna acción es ejecutada y el equipo se retorna a funcionamiento. [12]

Tabla 2.1 Clasificación de la degradación [12]

Grado	Descripción	Degradación
1	Excelente	0 al 10%
2	Muy bueno	11 al 25%
3	Bueno	26 al 40%
4	Aceptable	41 al 55%
5	Deficiente	56 al 70%
6	Muy deficiente	71al 85%
7	En falla	Mayor a 85%

En este modelo, la condición del equipo se clasifica en varias etapas, siendo la primera, la etapa de “buen estado” y la última, la “etapa de falla”. La falla del equipo puede ser identificada inmediatamente, y el mismo es restaurado, a través, del Mantenimiento Correctivo. Ambos, el mantenimiento correctivo y el preventivo, llevan al equipo a una etapa de “tan bueno como nuevo”. [12] Los porcentajes o niveles de degradación para definir la condición del equipo y, así como también, el nivel máximo de deterioro permisible son establecido por la organización, según sean, sus políticas de mantenimiento y de manejo de las fallas.

- **Consideraciones para la aplicación del modelo**

1. En orden de enfocarse en las características básicas del modelo del MBC, se consideran solo fallas suaves; para el caso de las fallas súbitas no son consideradas en este estudio. Las fallas suaves crecen gradualmente con el tiempo y conducen a una situación predecible que permite un monitoreo de la condición. Generalmente, estas fallas ocurren debido a mecanismos de deterioro.

2. Periódicamente, el equipo es puesto fuera de servicio para realizar una inspección; cada inspección revela, perfectamente, el estado de deterioro del mismo. Tras la inspección y, según sea, el nivel de deterioro revelado durante la misma, se tomará alguna de las siguientes acciones:

- Si el deterioro del equipo no ha alcanzado el nivel de degradación límite, no se realiza ninguna acción de mantenimiento y el equipo es retornado a operación.
- Si el equipo ha alcanzado el nivel de degradación establecido como máximo permisible, se le efectúa un mantenimiento preventivo.

Por ejemplo: Se establece que el nivel límite permisible de degradación del equipo es de 70%. Entonces, si durante una inspección programada se revela que su degradación es del 40%, no se realiza ninguna acción y es retornado a operación. En caso contrario, si con la inspección se establece que el nivel de degradación del activo es del 75%, el mismo es sometido a una acción preventiva y puesto en funcionamiento nuevamente.

3. Mientras el equipo esta bajo inspección o durante una labor de mantenimiento no esta ni operando ni deteriorándose.

4. Tras alcanzar un porcentaje o nivel de degradación determinado, el equipo falla debido al deterioro de sus parámetros de funcionamiento. Tras la ocurrencia de esta falla, se realiza un mantenimiento correctivo y el sistema es restaurado a la condición de “tan bueno como nuevo”.

5. El tiempo de funcionamiento entre inspecciones sucesivas esta distribuido exponencialmente. Alternativamente, las inspecciones son realizadas solo cuando el sistema esta en una condición operacional, y ellas son iniciadas con una tasa constante.

6. La duración entre cada etapa de funcionamiento del equipo si ninguna acción de mantenimiento es iniciada, sigue una distribución exponencial con frecuencia $[k \cdot \lambda_d]$.

Un proceso de Markov como el estudiado en este modelo, a su vez, constituye un proceso ordinario de Poisson, puesto que, en un tiempo continuo, los únicos cambios en el mismo son los llamados “saltos hacia arriba”, es decir, la degradación va aumentando gradualmente desde una etapa a otra. Por consiguiente, el número de transiciones en $(0, k]$ sigue una distribución Poisson con media $[k \lambda]$; donde k representa el número de etapas en las que se clasifica el proceso del deterioro del equipo y λ es conocido como la rata del proceso de Poisson.

Para entender la definición de k se da el siguiente ejemplo: se considera como ejemplo, el estudio del deterioro del motor diesel de una locomotora.

En el proceso de análisis de la degradación del motor, se toma como referencia, la clasificación de la degradación presentada en la tabla 2.1; por lo tanto, el deterioro del motor se clasifica en siete (7) etapas; $k = 7$; donde la primera etapa es la de tan bueno como nuevo y la última es la etapa de falla.

7. Todos los períodos de tiempo (duración) de la reparación están distribuidos exponencialmente; $1/\mu_m < 1/\mu_d$. [12]

Cuando el equipo bajo estudio se encuentra en el período normal, es decir, donde $\lambda(t)$ es constante, se puede definir tanto la tasa de falla (λ) y la tasa de reparación (μ) en función del tiempo y, por lo tanto, se pueden expresar de la siguiente forma [5]:

$$\lambda = \frac{1}{TMEF} \quad (\text{Ec. 2.25})$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (\text{Ec. 2.26})$$

Tiempo promedio de reparación (MTTR): Es la medida de la distribución del tiempo de reparación de un equipo. [10]

- **Descripción y análisis de las etapas donde se encuentra el equipo**

En una cadena de Markov es importante identificar en que etapa se encuentra el equipo, puesto que, el iniciar o no una acción de mantenimiento dependerá del momento en que el equipo alcance el nivel de deterioro máximo. Entonces, siendo S (i), la etapa en la cadena de Markov donde se encuentra el equipo y si observa la figura 2.11 se tiene:

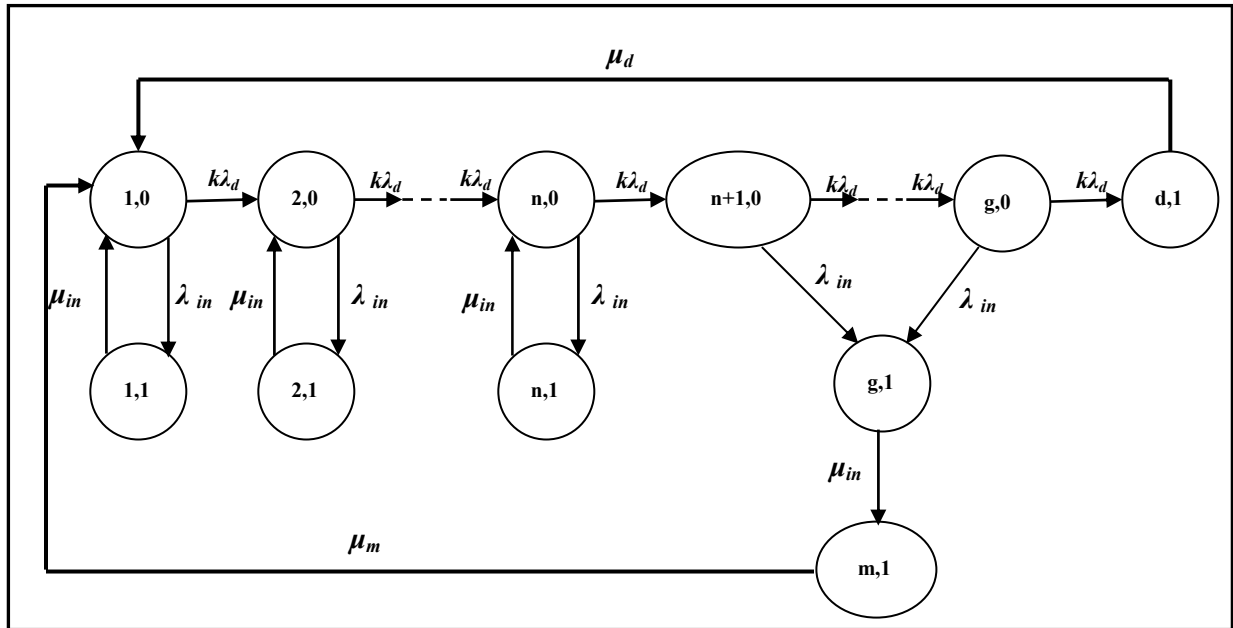


Figura 2.11.- Cadena de Markov para el modelo del MBC.

Fuente: Amari, V., (2004).

- $S(1, 0)$: El equipo está operando en la etapa de “tan bueno como nuevo”.
- $S(1, 1)$: El equipo está bajo inspección en la etapa 1.
- $S(n, 0)$: El equipo está operando en una etapa n .
- $S(n, 1)$: El equipo está bajo inspección en la etapa n .
- $S(g, 0)$: El equipo se encuentra operando en la etapa previa a la ocurrencia de falla.
- $S(g, 1)$: el equipo está bajo inspección en la etapa k donde se revela que el equipo alcanzó el nivel de deterioro máximo.

- $S(m, 1)$: el activo sometido a un mantenimiento preventivo y regresa a la condición de bueno.
- $S(d, 1)$: El equipo se encuentra en la etapa de falla donde es necesario realizar un mantenimiento correctivo para retornar el equipo a operación.
- $1/\lambda_d$: Tiempo promedio entre la etapa de “tan bueno como nuevo” y una falla del equipo debido al deterioro (sin ninguna acción de mantenimiento es iniciada). Por tanto, $\frac{1}{k\lambda_d}$, es el tiempo promedio entre dos etapas sucesivas de deterioro (sin ninguna acción de mantenimiento es iniciada).
- $1/\mu_m$: Duración promedio del mantenimiento preventivo.
- $1/\mu_m$: Duración promedio de una inspección.
- $1/\mu_d$: Duración promedio del mantenimiento correctivo siguiendo a una falla por deterioro.
- $1/\lambda_{in}$: Tiempo de funcionamiento promedio a la próxima inspección. **[12]**

En las consideraciones para la aplicación del modelo se establece que los períodos de duración de la reparación tanto preventiva como correctiva siguen una distribución exponencial con una tasa μ_m y μ_d . Igualmente, el tiempo entre inspecciones esta distribuido exponencialmente con tasa λ_{in} y la duración promedio

entre cada etapa de deterioro (sin ninguna acción es iniciado) sigue una distribución exponencial con tasa $k\lambda_d$. Entonces, para definir la gráfica de la cadena de Markov correspondiente al modelo del MBC se consideran son las tasas o rata respectivas, tal como se muestra en la figura 2.11.

En cuanto a, μ_{in} y λ_{in} , se diferencian, que la primera se relaciona con el tiempo promedio para realizar una inspección (TMPI) y la segunda, con el tiempo promedio entre inspecciones (TMEI).

Con el objeto de comprender, con mayor facilidad, el significado de: λ_d , λ_{in} , μ_d , μ_m y μ_{in} ; se retoma el ejemplo del motor diesel de la locomotora. Se tiene que el tiempo promedio entre dos etapas sucesivas sin ninguna acción de mantenimiento es iniciada es de **1000 horas**; el tiempo promedio que dura inspeccionar y analizar la condición del motor son **2 horas**. En promedio, el mantenimiento correctivo toma **100 horas** y el mantenimiento preventivo **20 horas**. El monitoreo de las condiciones del activo se realiza una vez cada **200 horas** [12]. Por tanto,

$$\frac{1}{\lambda_d} = 1000hrs; \frac{1}{\lambda_{in}} = 200hrs; \frac{1}{\mu_d} = 100hrs; \frac{1}{\mu_m} = 20hrs; \frac{1}{\mu_{in}} = 2hrs$$

✚ Estimación de la frecuencia usando las Cadenas de Markov (Modelo de MBC)

La frecuencia del mantenimiento preventivo viene dada por,

$$\text{Frecuencia del MP} = P(m,1) * \mu_m \quad (\text{Ec. 2.27})$$

Siendo,

$P(m,1)$ es la probabilidad que el equipo se encuentre bajo mantenimiento preventivo,

$$P(m,1) = c * e * g * P(1,0) \quad (\text{Ec. 2.28})$$

Y a su vez,

$P(1,0)$ representa la probabilidad que el equipo se encuentre en la etapa de “tan bueno como nuevo”,

$$P(1,0) = \frac{1}{(1+e) * n + c + b * f + c * e + c * e * g} \quad (\text{Ec. 2.29})$$

La frecuencia de las inspecciones será,

$$\text{Frecuencia de inspecciones} = A * \lambda_{in} \quad (\text{Ec. 2.30})$$

Donde,

A es la disponibilidad,

λ_{in} la tasa de inspección

La disponibilidad del equipo es la suma de las probabilidades de todas las etapas donde el equipo esta operando, así se tiene:

$$A = \sum_{i=1}^k P(i,0) = \frac{n + c}{(1 + e) * n + c + b * f + c * e + c * e * g} \quad (\text{Ec. 2.31})$$

Como se puede observar, las ecuaciones 2.28, 2.29, 2.31 se expresan en función de letras para facilitar el cálculo, solo resta sustituir los respectivos valores para obtener los valores deseados. Así se tiene que,

$$f \equiv \frac{k * \lambda_d}{\mu_d}; g \equiv \frac{\mu_{in}}{\mu_m}; h \equiv \frac{\mu_d}{\mu_m}; r \equiv \frac{k * \lambda_d}{\mu_{in}}; e \equiv \frac{\lambda_{in}}{\mu_{in}}; a \equiv \frac{k * \lambda_d}{k * \lambda_d + \lambda_{in}};$$

$$b \equiv a^{k-n}; c \equiv a * \frac{1-b}{1-a}$$

Con respecto, a los tiempos promedios entre dos actividades de mantenimiento preventivo y entre dos inspecciones, vienen dados por las siguientes ecuaciones. **[12]**

$$\text{Tiempo promedio entre MP} = \frac{1}{P(m,1) * \mu_m} \quad \text{(Ec. 2.32)}$$

$$\text{Tiempo promedio entre inspecciones} = \frac{1}{A * \lambda_{in}} \quad \text{(Ec. 2.33)}$$

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de investigación

De acuerdo a los objetivos planteados, la investigación estuvo enmarcada dentro de las siguientes modalidades:

3.1.1 Según la Estrategia

En el desarrollo de este Trabajo de Investigación se empleó la **Investigación Documental**, puesto que, resultó indispensable consultar todas aquellas fuentes (libros, manuales, artículos, entre otros) que nos brindasen la información bibliográfica referente al tema bajo estudio.

3.1.2 Según su Propósito:

Se puede clasificar como **Aplicada**, ya que, el modelo se desarrollo partiendo de las bases teóricas y modelos matemáticos de las distintas metodologías de estimación consideradas en este trabajo de investigación.

3.1.3 Según el nivel de conocimiento

El estudio de las distintas técnicas de estimación permitió identificar y describir los elementos característicos de cada una de ellas, igualmente, al momento del

desarrollo del nuevo modelo se estableció un paso a paso para su correcta aplicación, por todo esto, la investigación se puede considerar **Descriptiva**.

3.2 Población y muestra

La **población** se refiere a los siete (7) expertos en el área de la ingeniería de mantenimiento, que fueron entrevistados por sus conocimientos en los métodos para determinar la frecuencia de mantenimiento. A su vez, en este caso, la **muestra** es igual a la población.

3.3 Técnicas de investigación

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se emplearon las siguientes técnicas:

3.3.1 Técnicas de recolección de información

Se refieren a todas las formas o métodos empleados para la obtención de toda la información necesaria en el proceso investigativo. Para este trabajo se utilizaron las siguientes técnicas:

- **Técnica de investigación bibliográfica**

Mediante la búsqueda en cualquier fuente bibliográfica o documento (libros, manuales, revistas, entre otros) que nos brindase información sobre el tema bajo estudio. También, se procedió a la búsqueda en páginas web relacionadas con el área

de Mantenimiento, que constituyeron una fuente importante para recabar información.

- **Entrevistas**

Las entrevistas constituyeron una herramienta esencial para la obtención de información. Estas se realizaron a ingenieros y expertos en el área del mantenimiento, de tal manera, de conocer sus impresiones, opiniones y sugerencias, con respecto, a las distintas metodologías existentes para la estimación de la frecuencia de las actividades de mantenimiento.

3.3.2 Técnicas de análisis de la información

Existen dos técnicas de análisis de datos que fueron utilizadas en la ejecución de este trabajo de investigación, que son:

- **Análisis cualitativo:**

Esta técnica se aplicó tres (3) etapas: **preparación y descripción de la información** referente a las distintas técnicas de estimación, de forma tal, preparar la base documental y hacerla accesible y fácil de manejar; **reducción de datos**, lo que permitió identificar y seleccionar, únicamente, la información de las distintas metodologías que resultaba de interés para esta investigación; **análisis de la información**, se procedió a un estudio minucioso de los aspectos relacionados a: los métodos empleados para la determinación de la frecuencia, ecuaciones y variables involucradas, consideraciones generales, campos de aplicación, alcances y limitaciones de cada técnica de estimación.

- **Análisis cuantitativo:**

Consiste en dar valores a las distintas variables del modelo teórico. En nuestro caso, con el objeto de facilitar la comprensión de cada una de las metodologías de estimación consideradas en el trabajo, se presentaron ejemplos de cada una de ellas, en los cuales, se le asignaron valores a las variables involucradas en el cálculo de la frecuencia, de forma tal, de obtener el valor correspondiente. Luego, se procedió al análisis del resultado para establecer la factibilidad de la aplicación de cada uno de los métodos.

3.4.- Etapas de la investigación

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se siguieron las siguientes etapas:

ETAPA 1.- Revisión bibliográfica

El objetivo de esta fase de la investigación, consistió en obtener la mayor cantidad de material bibliográfico sobre las diferentes metodologías de estimación de frecuencias de mantenimiento preventivo que están siendo aplicadas en el ámbito industrial. Para tal fin, se consultaron libros, tesis, artículos publicados en distintas páginas web relacionadas al área del Mantenimiento, es fin, cualquier fuente bibliográfica donde se haga referencia al tema.

ETAPA 2.- Descripción de las diferentes técnicas de estimación.

En el transcurso de esta etapa se procedió a identificar y detallar las características, métodos y áreas de aplicación, requerimientos y los aspectos positivos

y negativos de cada una de las técnicas de estimación encontradas mediante la búsqueda bibliográfica.

ETAPA 3.- Estudio de los factores de mayor incidencia de las distintas técnicas de estimación dentro del escenario operacional.

Constituyó una fase esencial dentro del desarrollo del trabajo. En esta etapa, por medio, de un estudio de las distintas metodologías, se establecieron tanto sus aspectos positivos como negativos, con relación, a su aplicación en la determinación de las frecuencias de las actividades de mantenimiento de una instalación industrial. La identificación de los elementos característicos de cada técnica, es de suma importancia, ya que, permite establecer la conveniencia de su utilización para una aplicación en particular e, igualmente, conocer los requerimientos necesarios para su correcto uso.

ETAPA 4.- Establecimiento del modelo para la determinación de las frecuencias de mantenimiento.

Por estar directamente relacionada con el objetivo general de esta investigación esta fase resultó ser la de mayor importancia. Una vez, establecidos los elementos de mayor relevancia de las distintas metodologías de estimación analizadas se desarrolló el modelo para la determinación de las frecuencias de mantenimiento preventivo, cuya característica fundamental es su adaptabilidad a cualquier equipo dentro de una instalación industrial. Del modelo desarrollado se presentan sus características finales y método de aplicación, según sea, las condiciones particulares de cada escenario productivo.

ETAPA 5.- Formulación de indicadores de gestión de Mantenimiento.

Durante esta etapa, como su nombre lo indica, se formularon los distintos indicadores de gestión de mantenimiento que permitirán hacer seguimiento a los resultados, en cuanto, a las actividades realizadas con las frecuencias propuestas, logrando así, identificar si se están alcanzando los objetivos trazados, de no ser así, se deben corregir las desviaciones que no permiten que los sistemas o equipos tengan el rendimiento esperado.

CAPITULO IV

DESARROLLO DEL MODELO

El objetivo principal de este trabajo es el desarrollo de un modelo para la determinación de las frecuencias que se caracterice por su adaptabilidad al comportamiento real de los equipos **rotativos** y al escenario productivo donde ellos operan e, igualmente, que permita lograr una intervención oportuna y costo-efectiva de los activos físicos de una instalación industrial. El modelo desarrollado esta conformado por distintas técnicas de estimación de frecuencia, algunas de las cuales, se emplean en la actualidad para establecer los planes de mantenimiento y, algunas otras, que han sido desarrolladas por expertos en el área de ingeniería y el mantenimiento respondiendo a la necesidad de métodos que permitan alcanzar una planificación más precisa y efectiva de las actividades de mantenimiento. Sin embargo, se debe ser cuidadoso al momento de seleccionar algún método en particular, pues resulta indispensable asegurarse que el método seleccionado es el más acorde y que cualquier metodología es consistente con la data disponible y con las políticas de mantenimiento propias de cada organización.

Igualmente, se proponen algunos indicadores de mantenimiento, los cuales, permitirán una valoración cuantitativa del comportamiento y rendimiento de los equipos a lo largo del tiempo y, de esta forma, medir la efectividad del modelo en la estimación de las frecuencias de las tareas del mantenimiento preventivo.

4.1 Descripción de las metodologías empleadas para la estimación de las frecuencias de mantenimiento preventivo.

4.1.1 Estimación de frecuencias de mantenimiento basados en los históricos de fallas.

Para la estimación de la frecuencia empleando el histórico de fallas de un equipo se deben seguir los siguientes pasos:

1. Establecer un período o intervalo de estudio determinado.
2. Identificar en el registro de fallas, los número de fallas ocurridas durante el periodo bajo estudio e, igualmente, los tiempos entre fallas (TEF) correspondientes. En la gráfica se puede observar un ejemplo de la representación de los tiempos entre fallas (TEF) y los tiempos en paro o fuera de servicio (DT).

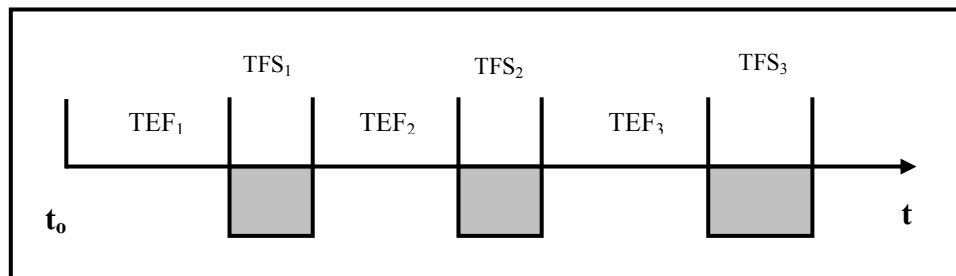


Figura 4.1.- Representación gráfica de los tiempos entre fallas (TEF).

Fuente: Suárez, D., (2001)

3. Con los tiempos entre fallas y el número de fallas, se procede a calcular el tiempo promedio entre fallas (TMEF) que vendrá a representar, el tiempo a transcurrir entre dos actividades de mantenimiento. Este tiempo se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$TMEF = \frac{\sum_{i=1}^n TEF_i}{n} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Donde:

TEF: tiempo entre falla

n: número de fallas.

EJEMPLO.- Se considera el caso de un tractor John Deere 2130. El objetivo es determinar la frecuencia de intervención para mantenimiento basándose en el registro histórico de fallas, del cual, se obtuvieron los datos mostrados en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Descripción de las fallas, modos, tef y número de fallas

Falla	Modo de falla	TEF(horas)	Nro. de fallas
El motor no arrancó	Batería con poca carga	24	4
		216	
		466	
		696	
	Inyectores sucios	890	3
		1560	
2320			
El motor sufrió sobrecalentamiento	Panel de radiador sucio	192	4
		422	
		612	
		882	
	Correa del ventilador floja	350	4
		770	
		1245	
		1680	

Fuente: Propia

Para determinar la frecuencia de las actividades de mantenimiento, ya sea, para la inspección o el reemplazo del componente, se debe calcular el tiempo promedio entre fallas usando la ecuación 4.1. Tomando como ejemplo los TEF de la tabla 4.2, se tiene:

Tabla 4.2.- Valores de los TEF y número de fallas

Falla	Modo de falla	TEF(horas)	Nro. de fallas
El motor no arrancó	Batería con poca carga	24	4
		216	
		466	
		696	

Fuente: Propia

$$TMEF = \frac{\sum_{i=1}^n TEF_i}{n} = \frac{24 + 216 + 416 + 696}{4} = \frac{1352}{4} = 338hrs$$

Tabla 4.3.- Resultados de los valores de los TMEF.

Falla	Modo de falla	TMEF(horas)	Observaciones
El motor no arrancó	Batería con poca carga	338	Cada 338 hrs se debe revisar la batería para comprobar si tiene carga suficiente o no.
	Inyectores sucios	1590	Cumplidas 1590 hrs se debe proceder a la limpieza de los inyectores
El motor sufrió sobrecalentamiento	Panel de radiador sucio	527	Cada 527 hrs se debe chequear el estado de limpieza del panel del radiador; en caso, de estar sucio, proceder a su limpieza
	Correa del ventilador floja	1011	Cumplidas 1011 hrs chequear si la correa del ventilador se encuentra floja o no.

Fuente: Propia

4.1.2 Estimación de la frecuencia basados en la confiabilidad.

Para la estimación de la frecuencia de ejecución de mantenimiento basándose en la confiabilidad se utiliza la distribución de Weibull por su adaptabilidad a cualquier distribución probabilística. Matemáticamente, la confiabilidad se expresa como:

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

Como el objetivo es estimar el intervalo de tiempo t que transcurre entre dos actividades de mantenimiento para un valor dado de confiabilidad se debe despejar t de la ecuación anterior, así se tiene:

$$t = \gamma + \eta \left[\text{Ln} \frac{1}{R(t)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Como se puede observar, el intervalo de tiempo t , queda expresado en función de la confiabilidad y de los parámetros de Weibull. El valor de la confiabilidad será seleccionado según las políticas de mantenimiento propias de cada empresa, es decir, dependiendo de los valores deseados de confiabilidad de los equipos. Para el cálculo de los parámetros se deben seguir los siguientes pasos:

1. Tomar los datos del histórico de fallas o de los resultados de ensayos para cada uno de los componentes del equipo bajo estudio; se identifican los tiempos entre fallas (TEF) y se ordenan de forma creciente (se le atribuye un orden “ i ” a cada TEF). Es de resaltar, que el estudio de la confiabilidad se hace por componente y no por equipos. El número de observaciones realizadas es el tamaño de la muestra.

2. Calcular la función de acumulación de fallas $F(i)$, cuya ecuación depende del tamaño de la muestra, y para ello se presentan tres casos:

- Para tamaños de muestra $N \geq 50$:
$$F(i) = \frac{i}{N} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Donde:

i : número de orden de la observación, ordenado de forma creciente.

N : número total de observaciones.

- Para $20 < N < 50$:
$$F(i) = \frac{i}{N+1} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

- Para $N \leq 20$:
$$F(i) = \frac{i-0.3}{N+0.4} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

3. Graficar las coordenadas de los puntos (F_i , TEF) en el papel Weibull, como el que se muestra en la figura 4.2.

4. Si el gráfico obtenido es una recta, en el papel Weibull se traza una recta paralela a esta que pase por el punto de Weibull buscando obtener el parámetro de forma β , ya que, el parámetro γ es cero; donde esta línea corte la línea vertical “b” (corresponde a la línea roja de la figura 4.2) se obtiene el parámetro de forma. Para hallar el parámetro de escala la recta original se prolonga hasta cortar el eje “t” (línea azul en la figura 4.2) y se lee η .

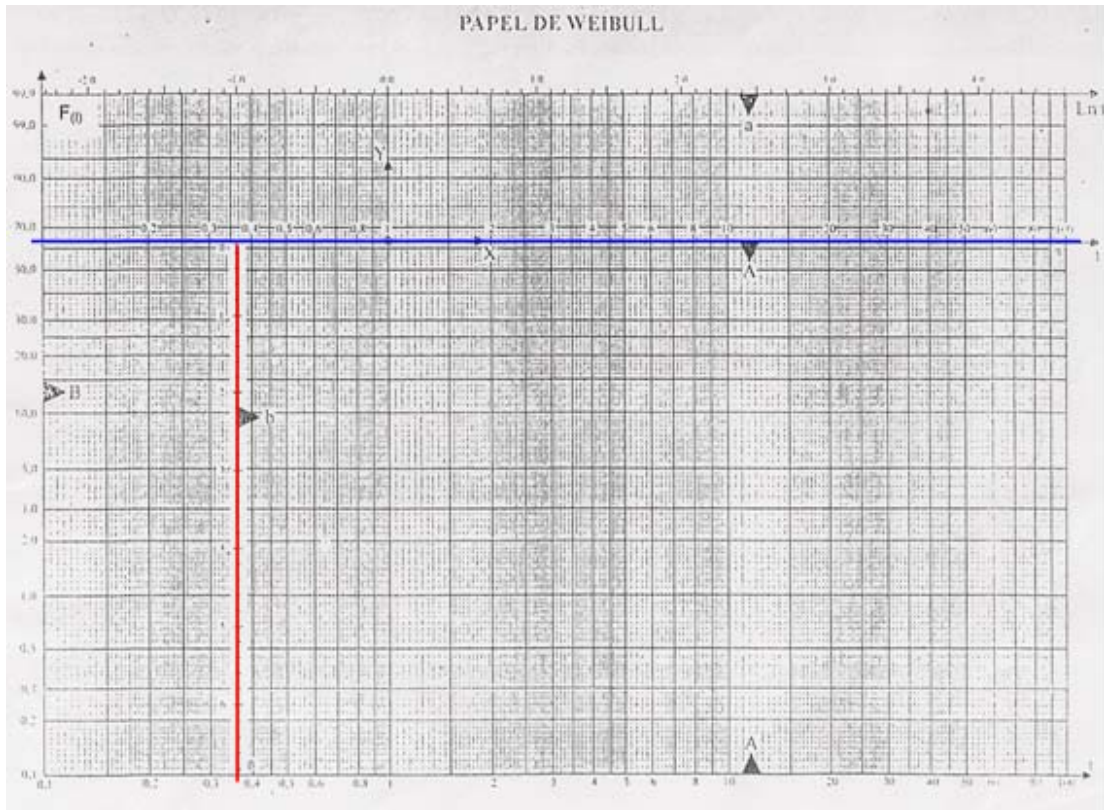


Figura 4.2.- Papel de Weibull.

Fuente: Suárez, D., 2001.

En caso de que el gráfico obtenido no resulte una recta sino una curva, los puntos se deben ajustar a una recta, por estimación o tanteo con distintos valores de γ . Para comprobar si el resultado obtenido es satisfactorio se determina si el % de error es menor o igual al 5% mediante la ecuación 4.6.

$$\%error = \frac{TMEF_D - TMEF_W}{TMEF_D} * 100\% \quad (\text{Ec. 4.6})$$

Donde:

TMEF_D: Tiempo promedio entre falla obtenido por la data.

TMEF_W: Tiempo promedio entre falla obtenido por Weibull.

Obtenido los valores correspondientes de los parámetros de Weibull y teniendo el valor de confiabilidad deseado se sustituyen en la ecuación 4.2 y se obtiene el intervalo de tiempo t que vendrá el período a transcurrir entre dos actividades de mantenimiento.

Es de hacer notar, que cuando $\beta < 1$, el equipo se encuentra en la etapa de arranque, la cual, coincide con el período de garantía del mismo. Entonces, se deben tomar las recomendaciones del fabricante, en cuanto, a las acciones de mantenimiento a realizar y la frecuencia que se le debe asignar a las mismas, puesto que, si se ejecutan acciones de mantenimiento innecesarias se puede generar la aparición de fallas no previstas que pudiesen ocasionar un deterioro prematuro del equipo.

EJEMPLO.- Un estudio de confiabilidad de rodamientos de una bomba centrífuga fue realizado por el departamento de mantenimiento de una empresa, obteniéndose los siguientes tiempos entre fallas (TEF) en horas en el seguimiento de 10 de estos componentes: 3200, 4700, 1800, 2400, 3900, 2800, 4400, 3600 para fallas relacionadas con el desgaste abrasivo sobre las superficies de rodadura de los mismos. Se desea determinar el intervalo de mantenimiento t , si se considera que por políticas de la empresa la confiabilidad de los rodamientos debes ser del 85%.

Primero, se deben ordenar los TEF en forma creciente como se muestra en la tabla 4.4.

Tabla 4.4.- Valores de los TEF

Orden N°	TEF (horas)
1	1800
2	2400
3	2800
4	3200
5	3600
6	3900
7	4400
8	4700

Fuente: Propia

Para facilitar el cálculo de los parámetros de Weibull y del valor correspondiente de t para una confiabilidad del 85% se empleó el AUTOCON 1.0; obteniéndose los siguientes resultados:

Resultados de parámetros y Estimación de Confiabilidad

Parámetro de Forma (β) 3,186017

Parámetro de Escala (η) (Horas) 3530,975

Parámetro de Posición (γ) (Horas) 0

Tiempo en Estudio (Horas) 1996,273 ✓

La Confiabilidad del Equipo Bomba Centrífuga es: 0.85 ✓

Atras Aceptar

Figura 4.3.- Resultados obtenidos usando el AUTOCON 1.0

En la figura 4.4 se muestra el papel de Weibull del que se obtuvieron el valor de los parámetros de forma (β) y de escala (η). El parámetro de posición, por tratarse de una recta es igual a 0.

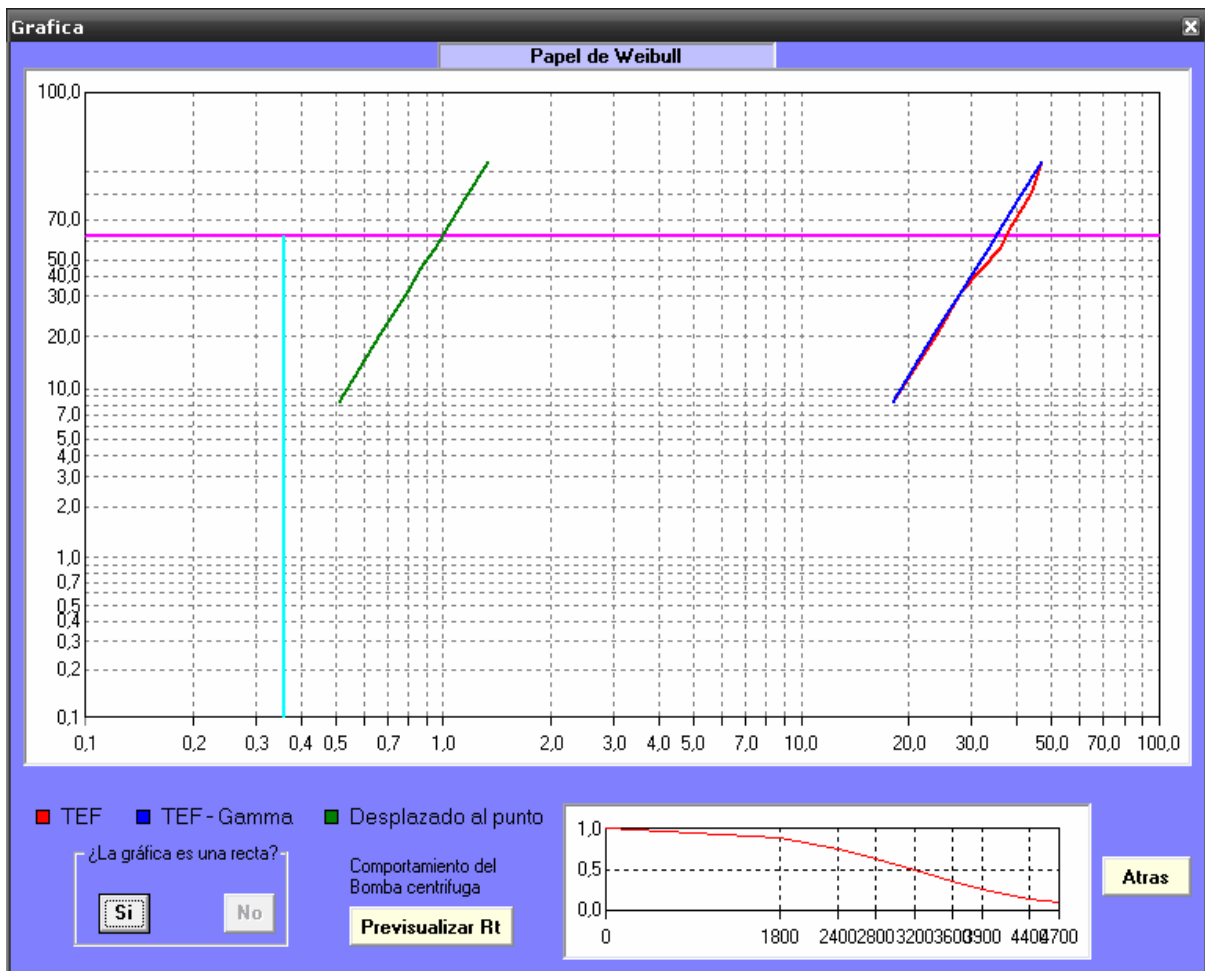


Figura 4.4.- Papel de Weibull obtenido en el AUTOCON 1.0

Es decir, para garantizar una probabilidad de buen funcionamiento de los rodamientos del 85% y así evitar la falla de la bomba centrífuga debido al desgaste abrasivo de los mismos, el tiempo a transcurrir hasta el próximo mantenimiento es de 1996 horas.

4.1.3 Modelos matemáticos para políticas de mantenimiento propuesto por Barlow y Hunter

Como se menciona en el capítulo 2, tanto la política I como política II permiten determinar el valor de t_p , que es el tiempo para llevar a cabo el reemplazo preventivo y que minimiza el costo esperado por unidad de tiempo $UEC(t_p)$. Siendo $UEC(t_p)$ una función de una sola variable, t_p , entonces, para resolver este tipo de problema se puede utilizar el método de la sección dorada, el cual, ofrece un algoritmo para la búsqueda directa.

- **Método de la sección dorada**

Para emplear el algoritmo se deben hacer los siguientes planteamientos:

$$\text{Minimizar } g(t) \approx UEC(t)$$

$$\text{Sujeto a } a \leq t \leq b$$

Donde, el intervalo $[a, b]$ representa el intervalo de estudio escogido. Para lograr una solución más sencilla se recomienda restringir el período de estudio a semanas completas.

Los pasos a seguir para la resolución del algoritmo son:

1. Elegir un nivel de tolerancia permisible, δ , el cual sirve como criterio de terminación para el algoritmo, $\delta > 0$.

Suponer que el intervalo inicial en el que se encuentra el mínimo es $[a_1, b_1] = [a, b]$ y hacer $\lambda_1 = a_1 + (1 - \alpha)(b_1 - a_1)$, $\mu_1 = a_1 + \alpha(b_1 - a_1)$; donde α es una constante inherente al modelo matemático y que es igual a:

$$\alpha = \frac{\sqrt{5} - 1}{2} = 0,618$$

2. Evaluar $g(\lambda_1)$ y $g(\mu_1)$, hacer $k = 1$, y proseguir al paso 3.
3. Existen tres (3) posibles resultados:
 - Si $b_k - a_k < \delta$, culmina la ejecución del algoritmo, ya que la solución ideal es $t = (a_k + b_k)/2$.
 - Si $g(\lambda_k) > g(\mu_k)$, ir al paso 4.
 - Si $g(\lambda_k) \leq g(\mu_k)$, ir al paso 5.
4. Hacer $a_{k+1} = \lambda_k$ y $b_{k+1} = b_k$. Además, hacer $\lambda_{k+1} = \mu_k$ y $\mu_{k+1} = a_{k+1} + \alpha(b_{k+1} - a_{k+1})$. Evaluar $g(\mu_{k+1})$ e ir al paso 6.
5. Hacer $a_{k+1} = a_k$ y $b_{k+1} = \mu_k$. Igualmente, hacer $\mu_{k+1} = \lambda_k$ y $\lambda_{k+1} = a_{k+1} + (1 - \alpha)(b_{k+1} - a_{k+1})$. Evaluar $g(\lambda_{k+1})$ y continuar al paso 6.
6. Sustituya k por $k+1$ y vaya al paso 1.

El proceso de iteración se detiene cuando $b_k - a_k < \delta$; es decir, cuando la diferencia de entre los extremos a y b del intervalo se hace menor a la tolerancia permisible.

Se debe acotar que λ y μ son variables que se introducen en el algoritmo para facilitar la resolución del mismo. Igualmente, k , corresponde al número de la iteración, es decir, si se tiene $k=1$ se refiere a la primera iteración y así sucesivamente.

POLÍTICA TIPO I

EJEMPLO.- Un componente Y de un equipo tiene una función de densidad de probabilidad de tiempo hasta la falla $f(t)$ que sigue una distribución uniforme

entre [0,10] semanas, es decir, que existe la misma probabilidad que ocurra una falla a lo largo de ese intervalo.

El costo del reemplazo preventivo es de 5 dólares y el costo de reemplazo por falla es 50 dólares. Determine el tiempo de reemplazo preventivo t_p .

El empleo de una política de tipo I es apropiada cuando la función de tasa de fallas es una función creciente del tiempo. En otras palabras, a medida que aumenta la edad del equipo, es más probable que éste falle.

La función de densidad de probabilidad uniforme para el tiempo hasta la falla está dado como:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} = \frac{1}{10} \rightarrow 0 \leq t \leq 10 \\ 0 \rightarrow \text{en caso contrario} \end{cases}$$

La función de distribución para la falla en el tiempo t es

$$F(t) = \begin{cases} \int_0^t \frac{1}{10} dt = \frac{1}{10} t & 0 \leq t \leq 10 \\ 1 & t \geq 10 \end{cases}$$

La confiabilidad del equipo en el tiempo t es

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \frac{1}{10} t$$

La función de falla está dada por

$$r(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{1}{10}}{1 - \frac{1}{10} t} = \frac{1}{10 - t}$$

El término $r(t)$ es una función creciente en el rango especificado. Para aplicar el modelo se necesita calcular la media de la distribución truncada en t_p ($M(t_p)$), a partir de la ecuación 2.4 (capítulo 2):

$$M(t_p) = \frac{\int_0^{t_p} t \frac{1}{10} dt}{1 - R(t_p)} = \frac{t_p}{2}$$

El costo esperado por unidad de tiempo es obtenido, a través, de la ecuación 2.3 (capítulo 2), en la cual, sustituyendo los valores correspondientes se tiene:

$$UEC(t_p) = \frac{5\left(1 - \frac{1}{10} t_p\right) + 50 \frac{1}{10} t_p}{t_p \left[1 - \frac{1}{10} t_p\right] + \frac{t_p}{2} \frac{1}{10} t_p} = \frac{5 + 4.5t_p}{t_p - \frac{1}{20} t_p^2}$$

Para obtener el valor de t_p que minimice a $UEC(t_p)$ dado en la ecuación anterior, a continuación, se aplica el método de la sección dorada:

ITERACIÓN 1

$$[a_1, b_1] = [0, 10] \quad \alpha = 0.618 \quad 1 - \alpha = 0.382$$

$$\lambda_1 = a_1 + (1 - \alpha)(b_1 - a_1) = 0 + 0.382 * 10 = 3.82$$

$$\mu_1 = a_1 + \alpha(b_1 - a_1) = 0 + 0.618 * 10 = 6.18$$

$$g(\lambda_1) = g(3.82) = 7.18$$

$$g(\mu_1) = g(6.18) = 7.68$$

Debido a que $g(\lambda_1) \leq g(\mu_1)$ se va al **paso 5** y el siguiente intervalo es

$$a_2 = a_1 = 0 \quad [a_2, b_2] = [0, 6.18]$$

$$b_2 = \mu_1 = 6.18$$

ITERACIÓN 2

$$\lambda_2 = a_2 + (1 - \alpha)(b_2 - a_2) = 0 + 0.382 * 6.18 = 2.36$$

$$\mu_2 = \lambda_1 = 3.82$$

$$g(\lambda_2) = g(2.36) = 7.50$$

$$g(\mu_2) = g(3.82) = 7.18$$

Puesto que $g(\lambda_2) > g(\mu_2)$ se continua hasta el **paso 4** y el intervalo es

$$a_3 = \lambda_2 = 2.36$$

$$b_3 = b_2 = 6.18$$

$$[a_3, b_3] = [2.36, 6.18]$$

ITERACIÓN 3

$$\lambda_3 = \mu_2 = 3.82$$

$$\mu_3 = a_3 + \alpha(b_3 - a_3) = 2.36 + 0.618 * 3.82 = 4.72$$

$$UEC(\lambda_3) = UEC(3.82) = 7.18$$

$$UEC(\mu_3) = UEC(4.72) = 7.28$$

Resultando $g(\lambda_3) \leq g(\mu_3)$ se va al **paso 5** y el intervalo resultante es

$$a_4 = a_3 = 2.36$$

$$b_4 = \mu_3 = 4.72$$

$$[a_4, b_4] = [2.36, 4.72]$$

ITERACIÓN 4

$$\lambda_4 = 2.36 + 0.382 * 2.36 = 3.26$$

$$\mu_4 = \lambda_3 = 3.82$$

$$g(\lambda_4) = g(3.26) = 7.21 \text{ y } g(\mu_4) = g(3.82) = 7.18$$

Debido a que $g(\lambda_4) > g(\mu_4)$ se aplica el **paso 4** siendo el nuevo intervalo:

$$a_5 = \lambda_4 = 3.26$$

$$b_5 = \mu_4 = 4.72$$

$$[a_5, b_5] = [3.26, 4.72]$$

ITERACIÓN 5

$$\lambda_5 = \mu_4 = 3.82$$

$$\mu_5 = 3.26 + 0.618 * 1.46 = 4.16$$

$$g(\lambda_5) = g(3.82) = 7.18$$

$$g(\mu_5) = g(4.16) = 7.21$$

El siguiente intervalo donde se encuentra la solución es $[a_6, b_6] = [3.26, 4.16]$

$$a_6 = a_5 = 3.26$$

$$b_6 = \mu_5 = 4.16$$

Sin embargo, se puede terminar después de cinco (5) iteraciones, puesto que, al evaluar $g(\lambda)$ y $g(\mu)$ sus valores no muestran variación y tienden a ser lo mismos de una iteración a otra, por tanto, la solución se aproxima con:

$$t_p = \frac{a_k + b_k}{2} = \frac{a_6 + b_6}{2} = \frac{3.26 + 4.16}{2} = 3.71 \approx 4$$

Es decir, el tiempo para llevar a cabo un reemplazo preventivo es cada **4 semanas**.

Mediante el enfoque sencillo, es decir, evaluando la función UEC(t_p) en los puntos 1,2,..., 10, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 4.5.- Evaluación del costo esperado. [5]

t_p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$UEC(t_p)$	10	7.78	7.25	7.18	7.33	7.62	7.91	8.54	9.91	∞

POLÍTICA TIPO II

EJEMPLO.- Calcule la política ideal tipo II para el problema dado en el ejemplo anterior. Una política tipo II determina el t_p , que es el número de horas totales de operación después de las cuales se efectúa un mantenimiento preventivo.

El término t_p minimiza la ecuación 2.5 (capítulo 2) que es:

$$UEC(t_p) = \frac{C_p + C_f H(t_p)}{t_p}$$

Se necesita determinar $H(t_p)$, el cual, se obtiene empleando la ecuación 2.6 (capítulo 2):

$$H(t_p) = \int_0^{t_p} r(t) dt$$

$$r(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$$

$$f(t) = \frac{1}{10}$$

$$r(t) = \frac{\frac{1}{10}}{1 - \frac{1}{10}t} = \frac{1}{10 - t}$$

$$H(t_p) = \int_0^{t_p} \frac{1}{10-t} dt = -\ln(10-t) \Big|_0^{t_p} = \ln \frac{10}{10-t_p}$$

$$UEC(t_p) = \frac{5 + 50 \ln \frac{1}{10-t_p}}{t_p} = \frac{5}{t_p} + \frac{50}{t_p} \ln \frac{10}{10-t_p}$$

Empleando el método de la sección, tal y como se hizo, en el ejemplo anterior, se determina que el valor de t_p que da el menor costo es $t_p = 3$ semanas, es decir, que el mantenimiento preventivo deberá realizarse **cada 3 semanas**.

Aplicando el método de búsqueda sistemática simple que se utilizó en el ejemplo previo para la función $UEC(t_p)$ se obtienen los valores presentados en la tabla a continuación:

Tabla 4.6.- Evaluación del costo esperado. [5]

t_p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$UEC(t_p)$	10.27	8.07	7.61	7.63	7.93	8.47	9.30	9.57	13.35	∞

4.1.4 Estimación de la frecuencia basados en el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)

Basados en el proceso de análisis del MCC, a continuación, se presenta un método que permite de determinar el intervalo de tarea en condición, a partir, del intervalo PF. La frecuencia de dicha tarea se estima basándose en el tipo de consecuencias generadas por la falla (consecuencias en la seguridad/medio ambientales o consecuencias económicas/operacionales).

 **Determinación del intervalo de tarea en condición.**

- **Para modos de fallas con consecuencias relacionadas a la seguridad y el medio ambiente.**

Para determinar el intervalo de la tarea en condición o de inspección se pueden emplear tanto la ecuación 2.7 como la ecuación 2.8 del capítulo 2.

El número de inspecciones n se puede determinar la ecuación 2.9 del capítulo 2. Es de hacer notar, que para el cálculo n , previamente se deben definir el valor de la probabilidad aceptable de falla y la probabilidad de detección de la falla con la tarea en condición propuesta.

Los valores de la probabilidad aceptable de falla deberán ser establecidos por el **equipo natural de trabajo** dependiendo de la severidad o el impacto que tengan los efectos de una falla, para ello, corresponderá realizar un análisis del riesgo y los costos asociados a estos. En el análisis, tienen que ser considerados tanto los menores como los peores efectos, puesto que, esto permitirá seleccionar los valores de la probabilidad aceptable de falla que más se ajusten a la realidad y así determinar el número de inspecciones, con el cual, se puedan detectar el mayor número de fallas.

En las tablas 4.7 y 4.8, se muestra un ejemplo de como establecer los valores de esta probabilidad.

Tabla 4.7.- Probabilidad aceptable de falla. [11]

Clasificación de la severidad	Probabilidad aceptable (P_{acc})
I	0.0001
II	0.001
III	0.01
IV	0.1

Tabla 4.8.- Clasificación de la severidad. [11]

Severidad	
I	Posible muerte o discapacidad permanente, pérdida mayor en el sistema/daño secundario excediendo 1.000.000 \$, o incumplimiento significativo de regulaciones medio ambientales.
II	Posible lesión personal, pérdida mayor/daño secundario entre 100.000 u 1.000.000 \$.
III	Posible lesión menor/enfermedad, pérdida del sistema/daño secundario entre 10.000 y 100.000 \$.
IV	Mantenimiento o reparación no programada, daños por debajo de 10.000 \$.

El otro término en la ecuación 2.9 (capítulo 2), es el de la probabilidad de detección de una falla potencial con la tarea en condición propuesta. El valor de esta probabilidad está ligado a la exactitud o precisión de los dispositivos de detección empleados. Es importante, que la condición de falla que se define debe ser consistente con la técnica de detección de fallas propuesta. Entre las técnicas de diagnóstico se tiene: análisis de aceites, análisis de vibraciones, termografía, ultrasonido, entre otras. Para la selección de método de detección se cuenta con distintas fuente de información, como son, los manuales de mantenimiento y operación, entrevistas al personal de mantenimiento y operaciones, planos o dibujos, información provista por los diseñadores o vendedores, laboratorio de materiales (resultados de diversos ensayos) y diagramas de bloques funcionales.

- **Para modos de fallas con consecuencias operacionales y económicas.**

Otra forma de determinar el número de inspecciones, n , es utilizando la ecuación 2.12 del capítulo 2. Si la solución de la ecuación da como resultado:

- $n \leq 0$, no es costo-efectivo realizar una tarea en condición para tratar el modo de falla bajo estudio.

- $n \geq 1$, dividir PF entre n para determinar el intervalo de tarea apropiado.
- $0 < n < I$, el mínimo intervalo de tarea costo-efectivo se obtiene colocando $n = 1$ y PF se convierte el intervalo de tarea.

EJEMPLO.- Se desea determinar el intervalo de inspección del eje de pulverizador de una máquina para moler sólidos, el cual, está sometido a desgaste. Para el monitoreo del desgaste se emplea el análisis de vibraciones, teniéndose una probabilidad de detectar la falla durante la primera inspección de 0.8. El costo del mantenimiento basado en condición es 18.000\$, el costo de reparación por falla funcional es 4.650.000\$ y el costo de reparación por falla potencial es 3.375.000\$. También, se tiene una probabilidad tolerable de falla de 0.00010.

Para la resolución del problema planteado se emplea la metodología de estimación de la frecuencia basada en el MCC, en la cual, se establece que el intervalo de inspección según la ecuación 2.7 del capítulo 2 es:

$$I = \frac{PF}{n}$$

- Para modos de fallas relacionados con consecuencias a la seguridad y el medio ambiente se emplea la ecuación 2.9 (capítulo 2) y sustituyendo los valores correspondientes se tiene:

$$n = \frac{\ln(P_{acc})}{\ln(1 - \theta)} = \frac{\ln(0.00010)}{\ln(1 - 0.8)} = 5,722 \cong 6$$

- Para modos de fallas con consecuencias económicas, n se determina mediante la ecuación 2.12 (capítulo 2):

$$n = \frac{\ln \left[\frac{-\frac{TMEF}{PF} C_i}{(C_{n_{pm}} - C_{pf}) \ln(1 - \theta)} \right]}{\ln(1 - \theta)}$$

Previamente, antes de poder calcular el valor del número de inspecciones se debe determinar el intervalo PF. Para calcular dicho intervalo se toma como base un intervalo de tarea de mantenimiento programado existente, el cual, como ejemplo se consideró de 720 horas. Igualmente, a modo de ejemplo, se considera que la efectividad de dicha tarea para detectar la condición de falla potencial es de 0.62.

- Si se espera que el intervalo PF sea más largo que el intervalo de tarea existente, entonces empleando la ecuación 2.10 (capítulo 2) se obtiene que:

$$PF = \left(\frac{\ln(1 - \alpha)}{\ln(1 - \theta)} \right) * I = \left(\frac{\ln(1 - 0.62)}{\ln(1 - 0.8)} \right) * 720hrs = 432,859hrs \cong 433hrs$$

- Si se espera que PF sea más pequeño que el intervalo de tarea de inspección existente, a partir, de la ecuación 2.11 del capítulo 2 se tiene que:

$$PF = \left(\frac{0.62}{0.8} \right) * 720hrs = 558hrs$$

Ahora sí se puede calcular n para consecuencias económicas. Cabe destacar, que el TMEF para el modo de falla de altas vibraciones es igual a 17797 horas, el cual, se obtuvo del histórico de fallas del componente.

$$n = \frac{\ln \left[\frac{-\frac{17797hrs}{558hrs} 18000\$}{(4.650.000\$ - 3.375.000\$) \ln(1 - 0.8)} \right]}{\ln(1 - 0.8)} = 0.7914$$

Anteriormente, se menciona que cuando $0 < n < 1$, el mínimo intervalo de tarea costo-efectivo se obtiene colocando $n = 1$ y PF se convierte el intervalo de tarea, es decir, 720 hrs.

Finalmente, se determina el intervalo de inspección (I) tanto para el intervalo PF calculado con la ecuación 2.10 como el obtenido, a partir, de la ecuación 2.11, ambas del capítulo 2. Así se tiene:

- Con el intervalo PF obtenido de la ecuación 2.10:

$$I = \frac{433hrs}{6} = 72.166hrs \cong 72horas$$

- Con el intervalo PF calculado con la ecuación 2.11:

$$I = \frac{558hrs}{6} = 93horas$$

Tomando uno de los valores obtenidos, se puede establecer que, una vez, detectada la condición de falla potencial mediante el análisis de las vibraciones del eje, los intervalos de inspección dentro del intervalo PF, si el modo de falla tiene consecuencias relacionadas con la seguridad y el medio ambiente, serán 93 horas y, que según sea, la condición del eje revelada durante el monitoreo de su condición, alguna o ninguna acción de mantenimiento será llevada a cabo.

Entre las acciones posibles está: la reparación o el reemplazo del eje. En la figura 4.3 se muestra el intervalo PF del eje pulverizador para el modo de falla de altas vibraciones.

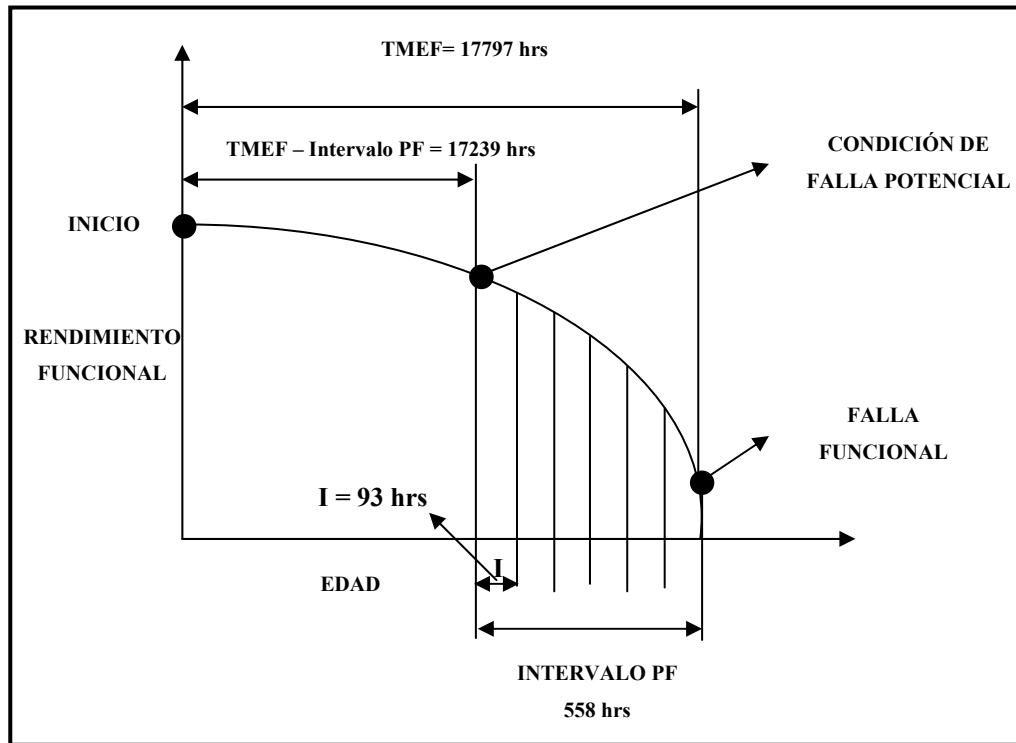


Figura 4.5.- Intervalo PF del eje del pulverizador de una máquina moledora (modo de falla: altas vibraciones).

Fuente: Propia.

Es importante, señalar que en el mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC) se sugiere que el intervalo de inspección ideal es a la mitad del intervalo PF, es decir:

$$I = \frac{1}{2} PF \quad (\text{Ec. 4.7})$$

Entonces, usando la ecuación 4.7 se tiene que:

$$I = \frac{1}{2} 558 \text{hrs} = 279 \text{hrs}$$

4.1.5 Estimación de la frecuencia usando el Análisis Costo Riesgo Beneficio (ACRB).

La metodología de ACRB permite determinar la frecuencia de las actividades de mantenimiento basándose en una combinación entre los costos asociados al realizar una actividad y los beneficios esperados e, igualmente, considerando los riesgos generados por la ocurrencia de una falla o evento no deseado al momento de la realización de tal actividad, a fin de establecer la frecuencia a la que se obtiene el máximo beneficio con el mínimo impacto.

Esta herramienta se basa en las curvas de los costos y los riesgos, mostradas en la figura 2.9 del capítulo 2. Estas curvas se construyen, a partir, de los valores de los costos y los riesgos modelados a distintas frecuencias. Luego, en base a estas curvas y procediendo a la suma del valor correspondiente del costo con el respectivo valor del riesgo, se define la curva de impacto total. El “mínimo relativo” de la curva de impacto total representa el período o frecuencia ideal para intervenir el activo y, en el cual, la suma de los costos de la política de mantenimiento con el nivel de riesgo asociado a esta política son mínimos, es decir, hay el “mínimo impacto posible en el negocio”.

- **Curva de costos:**

En los costos asociados a una actividad de mantenimiento se deben considerar tanto los costos directos como los indirectos. Los costos directos se relacionan con la cantidad que se gasta en un producto o en la operación del negocio y se refieren a los salarios laborales y compra de materiales. En la figura 4.6 se pueden observar estos costos.

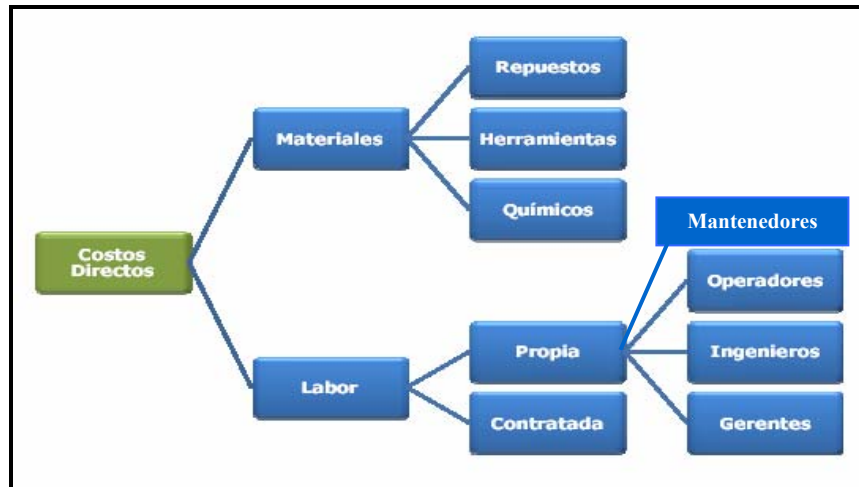


Figura 4.6.- Costos Directos

Fuente: Yáñez, M., Perdomo J y Gómez, H., (2004)

Los costos indirectos se refieren a cualquier beneficio perdido y/o pérdida por el riesgo de ocurrir cualquier evento no deseado mientras se realiza alguna acción de mantenimiento. Estos costos se exponen en la figura 4.7.

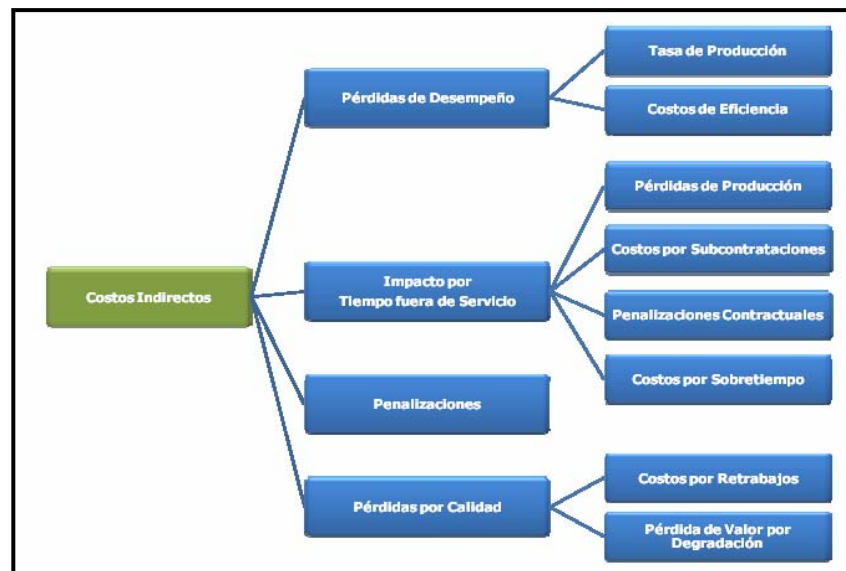


Figura 4.7.- Costos Indirectos

Fuente: Yáñez, M., Perdomo J y Gómez, H., (2004)

- **Curva de riesgos**

El riesgo es una combinación entre la probabilidad de falla y las consecuencias que genera dicha falla. Al cuantificar el riesgo es necesario que todos los peligros asociados a una actividad sean identificados, puesto que, un peligro no reconocido puede representar un riesgo no analizado. En la figura 4.8 se muestra el proceso para la cuantificación del riesgo.

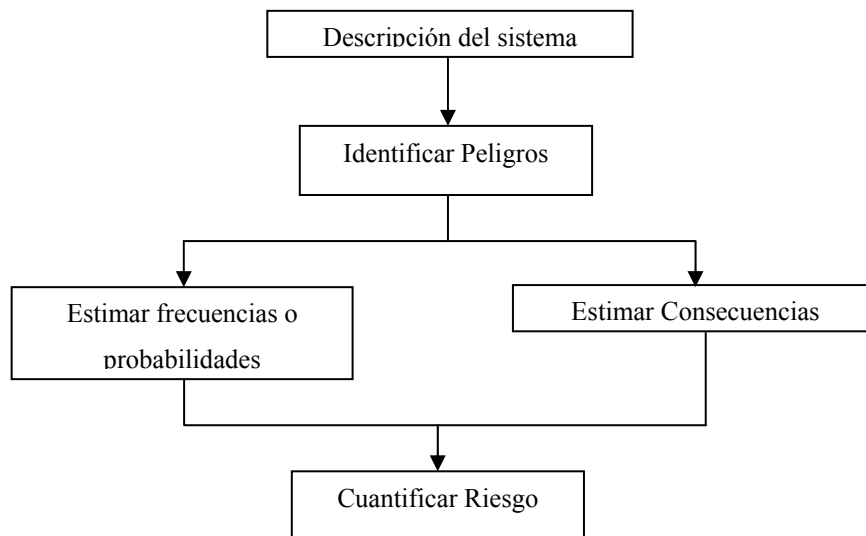


Figura 4.8.- Cuantificación del Riesgo.

Fuente: Propia.

Hay disponibles diferentes técnicas para identificar peligros y/o evaluar riesgos, entre cuales se tienen:

- **Análisis histórico de accidentes:** su objetivo primordial es detectar los peligros en una instalación por comparación con otras similares que hayan tenido accidentes registrados en el pasado.

- **Análisis preliminar de peligros:** se basa en la búsqueda bibliográfica de peligros que puedan hallarse presentes una nueva instalación a partir de la lista de sustancias o productos químicos presentes.

- **Análisis “¿Qué pasa si...?”:** su objetivo es la detección y análisis de las desviaciones sobre los procesos y condiciones previstas, intentando evitar aquellos eventos que puedan resultar no deseables.

- **Análisis mediante listas de comprobación:** consiste en contrastar la realidad de la planta con una lista muy detallada de cuestiones relativas a los más diversos ámbitos, tales como, condiciones de proceso, seguridad o estado de las instalaciones o servicios.

- **Análisis de peligros y operabilidad (HAZOP):** es una técnica orientada a identificar circunstancias de peligro y de accidente, siendo la operación (la garantía de funcionamiento) un aspecto secundario.

- **Análisis mediante árboles de fallos (FTA):** es un técnica que permite estimar la probabilidad de ocurrencia de un fallo determinado, a partir, del conocimiento de la frecuencia de ocurrencia de los sucesos indicadores o causales, mediante la utilización de procesos lógicos inductivos y la confección lógica de sucesos, denominada árbol de fallos.

- **Análisis mediante árboles de sucesos (ETA):** es similar al análisis de árboles de fallos, mediante este análisis se pretende estructurar la secuencia de eventos básicos que desencadenan un tipo de accidente concreto, estableciendo también las probabilidades de ocurrencia, si el conocimiento de los sucesos lo permite.

- **Inspección basada en riesgo (IBR):** es una metodología que permite definir los planes de inspección de equipos estáticos basados en la estimación de los riesgos asociado a su operación.

En la tabla 4.9 se presentan algunos modelos que se puede usar para determinar la probabilidad de falla.

Tabla 4.9.- Modelos típicos de probabilidad de falla. [15]

Tipo de suceso	Modelo de probabilidad utilizado	Datos necesarios
Suceso inicial que provoca la utilización de un componente en standby	Modelo de Poisson $f(x) = P(X = x) = e^{-\lambda t} \left(\frac{\lambda t}{x!} \right)$ siendo λ : frecuencia por unidad de tiempo $x = 0, 1, 2, 3 \dots$	Número de x de sucesos ocurridos en el tiempo t .
Componente standby que falla cuando es requerido para funcionar	Distribución binomial Probabilidad de falla constante p $P(X = x) = \binom{n}{x} p^x (1 - p)^{n-x}$ Siendo: $x = 0, 1, \dots, n$ n : número de requerimientos X : número aleatorio de fallas p : probabilidad de falla $\binom{n}{x} = \frac{n!}{x!(n-x)!}$	Número de sucesos de fallo x del número total de requerimientos N
Componente que falla mientras está en estado standby o entre una inspección y la siguiente	Tasa de fallas standby $p = 1 - \frac{1 - e^{-\lambda t_{test}}}{\lambda t_{test}}$ Siendo: λ : tasa de fallo standby t_{test} : tiempo entre inspecciones	Número de sucesos de fallo x durante el tiempo total de standby T

Tabla 4.9.- Continuación.

Tipo de suceso	Modelo de probabilidad utilizado	Datos necesarios
Componente que falla mientras está en operación	Modelo Exponencial $f(x) = 1 - e^{-\lambda t} \approx \lambda t$ Siendo λ : tasa de fallos = constante t = tiempo de operación	Número de fallos ocurridos en el tiempo de operación T .
Indisponibilidad de un componente debido a inspección	$p = \frac{T_{inspección}}{T_{entre\ inspecciones}}$	Duración media de la inspección y tiempo entre inspecciones
Indisponibilidad de un componente debido a mantenimiento programado (preventivo/correctivo)	$p = \frac{T_{en\ mantenimiento}}{T_{total\ de\ operación}}$	Tiempo total fuera de servicio debido a mantenimiento mientras el sistema funciona y tiempo total de operación
Indisponibilidad de un componente debido a mantenimiento programado (preventivo/correctivo)	$p = \frac{\mu T_m}{1 + \mu T_m}$ Siendo: μ : tasa de mantenimiento T_m : tiempo medio de corte por mantenimiento	Número de actuaciones de mantenimiento durante el tiempo T (para estimar μ)
Componente standby que nunca es inspeccionado	$f(x) = 1 - e^{-\lambda t}$ Siendo λ : tasa de fallos standby = constante t = tiempo de exposición hasta el fallo	Número de fallos por unidad de tiempo en standby

En la tabla 4.10 se describe como se pueden obtener los datos necesarios para evaluar las consecuencias de una falla.

Tabla 4.10.- Fuentes de información para la evaluación de las consecuencias de falla. [15]

1. Datos Históricos	<p>Los fallos y accidentes ocurridos en el pasado pueden ser analizados para obtener históricos de datos.</p> <p>Dichos datos en general pueden ser:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Genéricos (agrupados en base de datos). ✓ Estadísticas de la compañía (datos provenientes de la instalación). ✓ Datos provenientes de prácticas recomendadas. <p>Los datos históricos se pueden utilizar para:</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Determinar directamente las consecuencias de falla. ❖ Para determinar parámetros para los modelos físicos de consecuencias de falla. ❖ Para calibrar los modelos de consecuencias de falla.
2. Juicios Expertos	<p>Las consecuencias de falla evaluadas en cooperación con expertos (pueden ser expertos de la propia compañía o de fuera de ella).</p> <p>Los expertos pueden evaluar directamente las consecuencias de falla o proporcionar las entradas necesarias para un árbol de sucesos.</p>
3. Modelos	<p>Desarrollo de un modelo dado para determinar las consecuencias de falla.</p>

Las consecuencias económicas pueden calcularse como sigue:

$$CdF = C_{PP} + C_P + C_S + C_I \quad (\text{Ec. 4.8})$$

Donde:

C_{PP} = costo por pérdida de producción

C_P = costo por fallo primario (daño sobre el elemento que ha fallado).

C_S = costo por fallo secundario (daños sobre los elementos de los alrededores).

C_I = Costos indirectos (reputación en el mercado, entre otros).

EJEMPLO.- El costo de la actividad de mantenimiento propuesta que consiste en el cambio del eje de una bomba horizontal de superficie de un sistema de bombeo de agua cruda es de 1.000.000 BsF. Este monto se consideran los gastos de materiales, insumos, repuestos, horas – hombre y cualquier desembolso asociado a la realización de dicha tarea. ¿Determinar la frecuencia mediante simulación a la cual se obtiene el máximo beneficio con el mínimo impacto? Considere que ocurrió una falla en el mes de Enero, una en Marzo, una en Julio y otra en Octubre. El período de evaluación es de un (1) año. También, se conoce que las consecuencias debido a las fallas ocurridas durante el período en estudio, en unidades monetarias, son de 3.000.000 BsF.

Si se toma en cuenta, que este método se basa en la simulación a distintas frecuencias de los costos de ejecución de la tarea y del riesgo que se asocia con la misma, el primer paso que se debe realizar, es establecer los valores correspondientes a los costos y, seguidamente, los valores del riesgo. Así se tiene que,

Suponiendo que la actividad se realizaría cada mes a lo largo del año, es decir, 12 veces en el año, el costo respectivo se determina, a partir, de la siguiente relación:

$$\frac{1.000.000BsF}{Actividad} * \frac{1Actividad}{Mes} * \frac{12Meses}{Año} = 12.000.000BsF / Año$$

Si se realiza cada 6 meses, es decir, 2 veces en el año, se tendrá:

$$\frac{1.000.000BsF}{Actividad} * \frac{1Actividad}{6Meses} * \frac{12Meses}{Año} = 2.000.000BsF / Año$$

Repitiendo el mismo procedimiento, en la tabla 4.11 se muestran el valor respectivo del costo a distintas frecuencias.

Tabla 4.11.- Costo modelado a diferentes frecuencias.

Mes (cada cuanto se realiza la actividad)	Costo (MMBsF/Año)
1	12
2	6
3	4
4	3
5	2,4
6	2
7	1,7
8	1,5
9	1,33
10	1,2
11	1,09
12	1

Fuente: Propia

Definido los costos, se deben determinar los correspondientes valores del riesgo. Para calcular el riesgo se emplea la ecuación 2.19 del capítulo 2, es decir:

$$\text{Riesgo} = \text{Frec. de falla} * \text{Consecuencias}$$

Entonces, si se conoce que en el mes de enero, marzo, julio y octubre y que las consecuencias de dichas fallas (expresado en unidades monetarias) son 3.000.000 BsF, se tendrá:

Para una (1) falla:

$$\text{Riesgo} = \frac{1\text{Falla}}{\text{Año}} * \frac{3.000.000\text{BsF}}{\text{Falla}} = 3.000.000\text{BsF} / \text{Año}$$

Para tres (3) fallas:

$$\text{Riesgo} = \frac{3\text{Fallas}}{\text{Año}} * \frac{3.000.000\text{BsF}}{\text{Falla}} = 9.000.000\text{BsF} / \text{Año}$$

De igual manera, como se hizo con los costos, en la tabla 4.12 se define el riesgo estimado. Cabe destacar, el carácter acumulativo de las fallas.

Tabla 4.12.- Riesgo estimado en el período a evaluar.

Mes	Falla	Riesgo (MMBsF/Año)
1	1	3
2		3
3	1	6
4		6
5		6
6		6
7	1	9
8		9
9		9
10	1	12
11		12
12		12

Empleando el Microsoft Excel para obtener las curvas correspondientes a los costos y al riesgo, se obtiene:

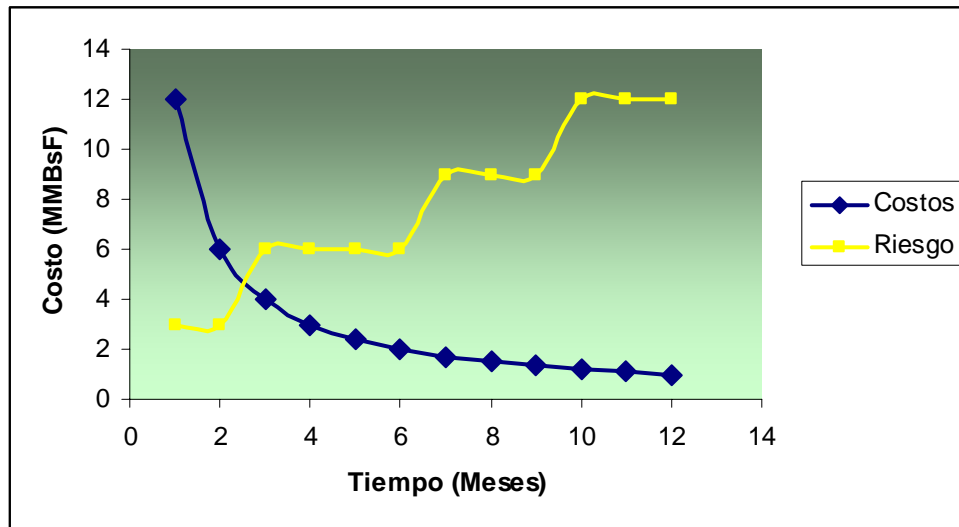


Figura 4.9.- Curva de los costos y del Riesgo.

Fuente: Propia.

Aprovechando que esta herramienta nos permite agregando una línea de tendencia obtener las ecuaciones polinómicas correspondientes a cada una de estas curvas, se tiene:

- Curva de costos:

$$C(t) = 0,1452t^2 - 2,5729t + 11,963 \quad (\text{Ec. 4.9})$$

- Curva de riesgo:

$$R(t) = 0,0007t^2 + 0,8609t + 2,136 \quad (\text{Ec. 4.10})$$

Definidas las curvas del riesgo y los costos, restaría determinar la curva de impacto total y siendo este:

$$I(t) = R(t) + C(t) \quad (\text{Ec. 4.11})$$

Para construir la curva de impacto total, primero, se deben sumar miembro a miembro las ecuaciones 4.9 y 4.10, de forma tal, de conseguir la ecuación polinómica correspondiente y, luego, evaluarla para las distintas frecuencias. Entonces:

$$\begin{array}{r} 0,1452t^2 - 2,5729t + 11,963 \\ 0,0007t^2 + 0,8609t + 2,1136 \\ \hline I(t) = 0,1459t^2 - 1,7120t + 14,077 \end{array} \quad (\text{Ec. 4.12})$$

En la tabla 4.13 se muestran los valores del impacto total a las distintas frecuencias.

Tabla 4.13.- Impacto total simulado a distintas frecuencias.

Mes	Impacto total (MMBsF/Año)
1	12,510
2	11,236
3	10,254
4	9,5630
5	9,1641
6	9,0570
7	9,2417
8	9,7182
9	10,487
10	11,547
11	12,899
12	14,542

Fuente: Propia

Se procede a graficar los valores mostrados en la tabla 4.13, para así, definir la curva de impacto total.

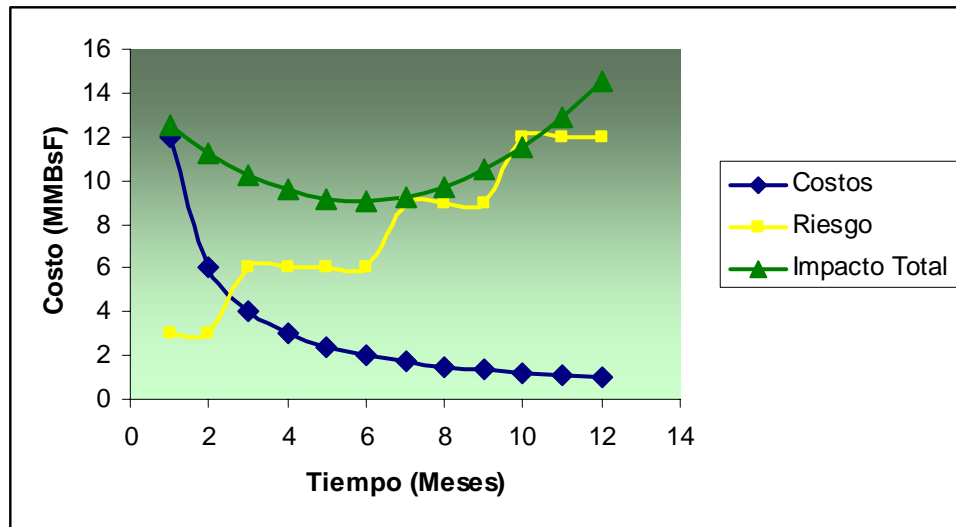


Figura 4.10.- Curva de los costos, del Riesgo y del Impacto total.

Fuente: Propia.

Finalmente, para determinar la frecuencia deseada se debe derivar la ecuación 4.12 e igualarla a 0, de forma tal, de obtener el mínimo correspondiente. Entonces,

$$\frac{dI}{dt} = 0,2918t - 1,7120 = 0$$

$$t = \frac{1,7120}{0,2918} = 5,8670 \cong 6 \text{ meses}$$

La frecuencia ideal para cambiar el eje de la bomba y, a la cual, se obtiene el mejor balance entre lo que se gasta y el riesgo asociado, es cada **6 meses**.

Otra forma de definir la curva del impacto total es sumando punto a punto las curvas de riesgo y de costos, es decir, el valor correspondiente del riesgo y del costo a la misma frecuencia. Estos valores se muestran en la tabla 4.14.

Tabla 4.14.- Valores del impacto total obtenidos de la suma punto a punto.

Mes	Costo (MMBsF/Año)	Riesgo (MMBsF/Año)	Impacto total (MMBsF/Año)
1	12	3	15
2	6	3	9
3	4	6	10
4	3	6	9
5	2,4	6	8,4
6	2	6	8
7	1,7	9	10,7
8	1,5	9	10,5
9	1,33	9	10,33
10	1,2	12	13,2
11	1,09	12	13,09
12	1	12	13

Fuente: Propia.

Graficando los respectivos valores de impacto de la tabla 4.14, se obtiene la siguiente curva:

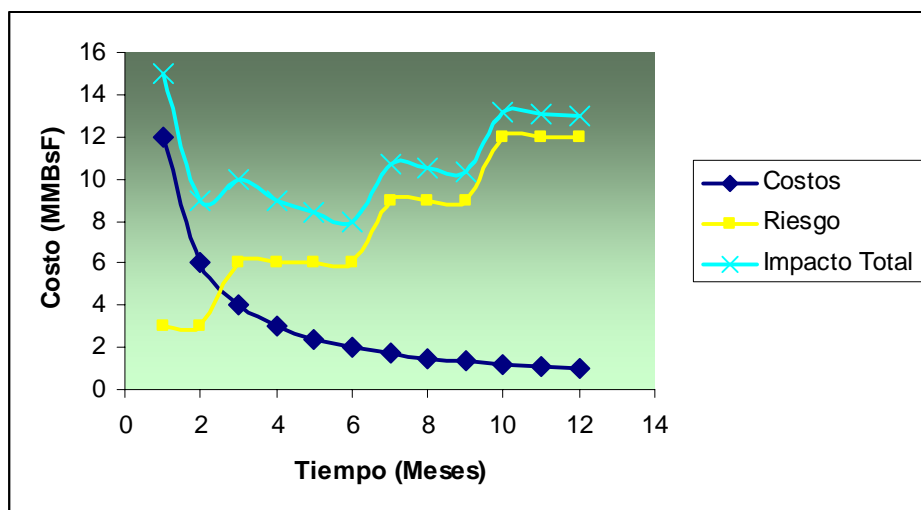


Figura 4.11.- Curva del Impacto total, a partir, de la suma punto a punto de la curva de costos y del riesgo.

Fuente: Propia

Agregando la respectiva línea de tendencia, se establece la ecuación polinómica que representa a la curva de impacto obtenida, la cual será:

$$I(t) = 0,1459t^2 - 1,7121t + 14,076 \quad (\text{Ec. 4.13})$$

Al comparar la ecuación 4.13 con la ecuación 4.12, se observa que son casi idénticas, por lo cual, se puede concluir que el valor de la frecuencia será el mismo, indiferentemente, del método que se aplique.

4.1.6 Estimación de la frecuencia de inspección de Mantenimiento Predictivo

Este método permite determinar la frecuencia de las inspecciones predictivas mediante la ecuación 2.23, siendo el inverso de esta expresión la frecuencia de inspección (f).

Este modelo es recomendable para valores de la rata de fallas (λ) menores que 1; $\lambda < 1$; ya que, para valores mayores que la unidad, la frecuencia de inspección se puede incrementar en tal dimensión, que los costos de inspección por año pueden ser superiores al costo de no poder detectar la falla.

EJEMPLO.- Calcular el valor del intervalo de inspecciones predictivas para un grupo rotativo motor-bomba de acople con rata de fallas de 1 vez cada 3 años, costo de inspección por análisis de vibraciones son 20\$ dólares y costo de no detectar la falla de 20 000\$. La cantidad de fallas que se pueden detectar en el grupo rotativo de acople directo utilizando análisis de vibraciones es igual a 20. Aplicando este método, el intervalo de las inspecciones predictivas viene dado por la ecuación 2.19 (cap. 2):

$$I = C * F * A$$

Por lo tanto, se deben calcular factor de costo (C), el factor de falla (F) y el factor de ajuste (A).

El factor de costo (C) se determina mediante la ecuación 2.20 (cap. 2) y sustituyendo los valores respectivos se tiene:

$$C = \frac{C_i}{C_f} = \frac{20\$}{20000\$} = 0.0010$$

A su vez, el factor de falla (F) se calcula, a partir, de la ecuación 2.20:

$$F = \frac{F_i}{\lambda}$$

Si se conoce que la rata de fallas es de 1 falla cada 3 años, entonces:

$$\lambda = \frac{1\text{falla}}{3\text{años}} = 0,3333\text{fallas / año}$$

Igualmente, se establece que, a partir, del análisis de vibraciones se pueden detectar 20 fallas. Sustituyendo los valores correspondientes a la cantidad de fallas que se pueden detectar con la técnica predictiva y la tasa de falla, se obtiene que:

$$F = \frac{F_i}{\lambda} = \frac{20\text{fallas / inspección}}{0.3333\text{fallas / año}} = 60.0060\text{años / inspección}$$

Por último, se debe definir el valor del factor de ajuste (A), el cual, se determina con la ecuación 2.22 (cap.2) y sustituyendo los valores necesarios se tiene que:

$$A = -\ln[1 - e^{-\lambda}] = -\ln[1 - e^{-0.3333}] = 1.2607$$

Para obtener el intervalo de inspección se sustituyen los valores correspondientes a C, F y A en la ecuación 2.19 y se tiene que:

$$I = C * F * A = 0.0010 * 60.0060 \text{ años / inspección} * 1.2607 = 0.0756 \text{ años / inspección}$$

Como se desea es calcular la frecuencia de inspección f , sólo se debe calcular el inverso del intervalo de inspección:

$$f = \frac{1}{I} = \frac{1}{0.00756 \text{ años / inspección}} = 13.2188 \text{ inspecciones / año}$$

$$\frac{13.2188 \text{ inspecciones}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ año}}{12 \text{ meses}} = 1.101 \text{ inspecciones / mes} \cong 1 \text{ inspección / mes}$$

Lo cual, se puede aproximar a **1 inspección por mes**.

4.1.7 Estimación de la frecuencia usando las Cadenas de Markov (Modelo de MBC)

Mediante el modelo del mantenimiento basado en condición y usando las cadenas de Markov, este método permite usando las ecuaciones 2.22 y 2.25 determinar la frecuencia tanto de las actividades preventivas como de las inspecciones. De igual manera, ofrece un algoritmo para encontrar los valores de ciertos parámetros de mantenimiento, como son, la tasa de inspección λ_{in} y la etapa límite para efectuar mantenimiento n ; mediante las cuales, se maximice la disponibilidad del equipo.

EJEMPLO 1.- Considere el ejemplo del motor diesel de una locomotora. La degradación o condición de deterioro del mismo, es identificada mediante el uso de técnicas de diagnóstico como el análisis de vibraciones y de emisiones. Su degradación se clasifica en **siete (7) etapas**, donde la última etapa es la de **falla**. Se ha

observado que el tiempo promedio entre dos etapas sucesivas, cuando luego de una inspección se define que según la condición del equipo no amerita ser intervenido, es decir, cuando ninguna acción de mantenimiento es llevada a cabo es de **1000 horas**; el tiempo promedio que dura inspeccionar y analizar la condición del motor son **2 horas**. En promedio, el mantenimiento correctivo toma **100 horas** y el preventivo **20 horas**. El monitoreo de las condiciones del activo se realiza una vez cada **200 horas**. Cuando la degradación del motor alcanza más de **50% de deterioro** se lleva a cabo un **mantenimiento preventivo**. Determinar la frecuencia, a la cual, se deben realizar las inspecciones e, igualmente la frecuencia del mantenimiento preventivo.

Con los datos suministrados en el problema se deduce que,

$k=7$

$$\frac{1}{\lambda_d} = 1000hrs \rightarrow \lambda_d = \frac{1}{1000} = 0.001$$

$$\frac{1}{\lambda_{in}} = 200hrs \rightarrow \lambda_{in} = \frac{1}{200} = 0.005$$

$$\frac{1}{\mu_{in}} = 2hrs \rightarrow \mu_{in} = \frac{1}{2} = 0.5$$

$$\frac{1}{\mu_m} = 20hrs \rightarrow \mu_m = \frac{1}{20} = 0.05$$

$$\frac{1}{\mu_d} = 100hrs \rightarrow \mu_d = \frac{1}{100} = 0.01$$

En cuanto al valor de n , se dice que si la degradación alcanza un 50% se debe realizar un mantenimiento preventivo, por lo tanto, el deterioro del motor no puede exceder del cuarto grado (tabla 2.1 cap. 2), es decir, $n = 4$.

Para el cálculo de las frecuencias de inspección y de ejecución del mantenimiento preventivo se emplean las ecuaciones 2.27 y 2.30 respectivamente del capítulo 2, que son:

$$\text{Frecuencia del Mantenimiento preventivo} = P(m,1) * \mu_m$$

$$\text{Frecuencia de inspecciones} = A * \lambda_{in}$$

Entonces, se deben definir primero $P(m,1)$ y A , mediante las ecuaciones 2.28 y 2.31 (cap. 2) respectivamente, para luego, proceder a determinar las frecuencias. Así se tiene:

$$P(m,1) = c * e * g * P(1,0)$$

$$A = \sum_{i=1}^k P(i,0) = \frac{n + c}{(1 + e) * n + c + b * f + c * e + c * e * g}$$

Y a su vez, $P(1,0)$ viene dado por la ecuación 2.29:

$$P(1,0) = \frac{1}{(1 + e) * n + c + b * f + c * e + c * e * g}$$

Las variables c, e, g, b, f se obtienen de la siguiente forma:

$$f \equiv \frac{k * \lambda_d}{\mu_d} = \frac{7 * 0.001}{0.01} = 0.7$$

$$e \equiv \frac{\lambda_{in}}{\mu_{in}} = \frac{0.005}{0.5} = 0.01$$

$$g \equiv \frac{\mu_{in}}{\mu_m} = \frac{0.5}{0.05} = 10$$

$$a \equiv \frac{k * \lambda_d}{k * \lambda_d + \lambda_{in}} = \frac{7 * 0.001}{(7 * 0.001) + 0.005} = 0.583$$

$$b \equiv a^{k-n} = (0.583)^{7-4} = 0.198$$

$$c \equiv a * \frac{1-b}{1-a} = 0.583 * \left(\frac{1-0.198}{1-0.583} \right) = 1.121$$

Entonces,

$$P(1,0) = \frac{1}{(1 + 0.01) * 4 + 1.121 + (0.198 * 0.7) + (1.121 * 0.01) + (1.121 * 0.01 * 10)}$$

$$P(1,0) = 0.1844$$

$$P(m,1) = 1.121 * 0.01 * 10 * 0.1844 = 0.0207$$

$$A = \frac{4 + 1.121}{(1 + 0.01) * 4 + 1.121 + (0.198 * 0.7) + (1.121 * 0.01) + (1.121 * 0.01 * 10)}$$

$$A = 0.9443$$

Obtenidos los valores necesarios y sustituyéndolos en las ecuaciones correspondientes, las frecuencias serán:

$$\mathbf{Frecuencia\ del\ MP} = 0.0207 * 0.05 = 0.00103$$

$$\mathbf{Frecuencia\ de\ inspecciones} = 0.9443 * 0.005 = 0.00472$$

Por último, se pueden calcular los tiempos promedios entre los mantenimientos preventivos y el tiempo promedio entre inspecciones empleando, para ello, las expresiones matemáticas 2.32 y 2.33 (cap. 2) respectivamente.

Obteniendo así:

$$\mathbf{Tiempo\ promedio\ entre\ MP} = \frac{1}{P(m,1) * \mu_m} = \frac{1}{0.00103} = 970.87 \cong 971hrs$$

$$\text{Tiempo promedio entre inspecciones} = \frac{1}{A * \lambda_{in}} = \frac{1}{0.00472} = 211.864 \cong 212hrs$$

Sin embargo, esta metodología ofrece un modelo matemático que permite determinar los valores ideales de λ_{in} y n que maximicen la **disponibilidad** del equipo.

- **Encontrando el valor de λ_{in} para dados valores de n y otros parámetros del modelo**

EJEMPLO 2.- Retomando el ejemplo del motor diesel de la locomotora, pero ahora con los siguientes datos:

$$k=7; \lambda_d = 0.001; \mu_{in} = 0.5; \mu_m = 0.05; \mu_d = 0.01; \text{ se debe definir un } \varepsilon \text{ que determina el error de la solución, } \varepsilon = 10^{-5}$$

Se desea determinar el valor de λ_{in} que maximice la disponibilidad del motor.

Para facilitar la resolución de este problema por la complejidad de las ecuaciones utilizadas, se diseñó una herramienta computacional apoyada en el **MAPLE 9.5** y que por medio del método de la secante permite el cálculo del valor ideal de λ_{in} . Una vez, ejecutado el programa, se obtiene que, $\lambda_{in} = 0.007363$. A continuación, se muestra la forma, en la que, el programa ejecuta el cálculo de la variable deseada.

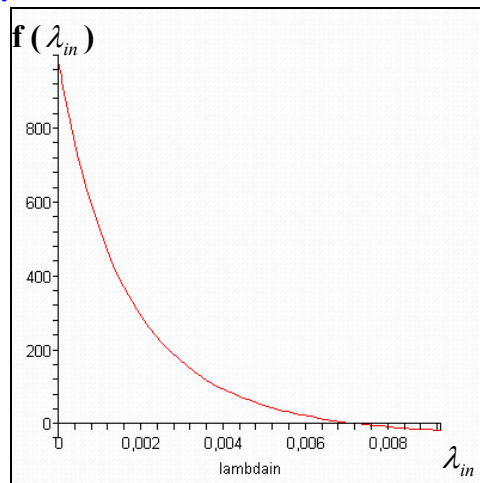
CODIGO DEL PROGRAMA Y CORRIDA PARA OBTENER λ_{in}

```
> with(LinearAlgebra):
> k:=7.:
> n:=4.:
> lambda:=0.001:
> mud:=0.01:
> mum:=0.05:
> muin:=0.5:
>
lambdaU1:=(lambda*muin)/(mud):f:=(k*lambda)/mud:h:=mud/mum:r
```

```

:=k*lambda_d/mu_in:s:=mu_in*(k-n)*(f-f*h-r):T:=n*k*lambda_d:q:=k-
n+1.:U:=(s/T)^(1/q):lambda_U2:=k*lambda_d*(U-1.):
> if (lambda_U1<lambda_U2) then;
> lambda_U:=lambda_U1;
> elif (lambda_U1>lambda_U2) then;
> lambda_U:=lambda_U2;
> end if;
>
lambda_U:e:=lambda_d/mu_in:w:=(k*lambda_d+lambda_d):a:=(k*lambda_d
)/w:E:=k-n:b:=a^E:H:=(1-b)/(1-
a):c:=a*H:C:=(k*lambda_d+lambda_d):bb:=-
(E*b)/C:X:=n+c:A:=(k*lambda_d*bb+c):XX:=(-
1./lambda_d)*A:Y:=n*e+b*f+(1.-b)*r+(1.-
b)*f*h:YY:=(n/mu_in)+bb*(f-f*h-
r):lambda_L:=0:Digits:=10:Tol:=10.^(-5):F:=Y*XX-X*YY:plot
(F(lambda_d),lambda_d=lambda_L..lambda_U);fsolve({F},{lambda_d},
lambda_L..lambda_U);

```



$$\lambda_{in} = 0.007363$$

Figura 4.12.- Gráfica de la función $f(\lambda_{in})$ obtenida del MAPLE 9.5.

Con este valor de, $\lambda_{in} = 0.007363$, se procede al cálculo de la disponibilidad, sin embargo, se debe determinar, nuevamente, los valores de a , b y c , para incluir el nuevo λ_{in} . Los valores de las variables restantes, es decir, e , g , f no cambian. Así se tiene:

$$a \equiv \frac{k * \lambda_d}{k * \lambda_d + \lambda_{in}} = \frac{7 * 0.001}{(7 * 0.001) + 0.007363} = 0.487$$

$$b \equiv a^{k-n} = (0.487)^{7-4} = 0.115$$

$$c \equiv a * \frac{1-b}{1-a} = 0.487 * \left(\frac{1-0.115}{1-0.487} \right) = 0.840$$

El nuevo valor de la disponibilidad será:

$$A = \frac{4 + 0.761}{(1 + 0.01) * 4 + 0.840 + (0.115 * 0.7) + (0.840 * 0.01) + (0.840 * 0.01 * 10)}$$

$$A = 0.9460$$

Igualmente, la frecuencia de las inspecciones y el tiempo promedio entre inspecciones serán:

$$\text{Frecuencia de inspecciones} = 0.9460 * 0.007363 = 0.00697$$

$$\text{Tiempo promedio entre inspecciones} = \frac{1}{A * \lambda_m} = \frac{1}{0.00697} = 143.47 \cong 143hrs$$

De igual manera, se tiene una nueva frecuencia para el mantenimiento preventivo y, con ello, del tiempo promedio. Estos nuevos valores se calculan como sigue:

$$P(1,0) = \frac{1}{(1 + 0.01) * 4 + 0.840 + (0.115 * 0.7) + (0.840 * 0.01) + (0.840 * 0.01 * 10)}$$

$$P(1,0) = 0.1979$$

$$P(m,1) = 0.761 * 0.01 * 10 * 0.1979 = 0.0150$$

$$\text{Frecuencia del MP} = 0.015 * 0.05 = 0.00075$$

$$\text{Tiempo promedio entre MP} = \frac{1}{P(m,1) * \mu_m} = \frac{1}{0.00075} = 1333.33 \cong 1333hrs$$

Comparando los resultados del tiempo promedio entre mantenimientos preventivos y el tiempo promedio entre inspecciones que se obtuvieron en el **ejemplo 1**, que fueron, respectivamente 971hrs y 212 hrs, y la disponibilidad del equipo que resulto ser 0.9443; con los valores resultantes del **ejemplo 2** de 1333 hrs, 143hrs y 0.9460; se puede concluir que intervalos de inspección más pequeños garantizan un seguimiento más regular de las condiciones y del rendimiento del motor, con lo cual, existe mayor posibilidad de detectar cualquier falla en su fase incipiente, evitando así, que pueda ocurrir un evento indeseado que obligue a poner al activo fuera de servicio. Por tanto, hay mayor posibilidad de contar con un equipo disponible para cumplir su función asignada cuando así sea requerido. En cuanto a los tiempos promedios entre mantenimiento preventivos, si el tiempo a transcurrir entre dos actividades es mayor, quiere decir que el equipo se encuentra mayor tiempo en operación y, por tanto, se aprovecha más su vida útil.

- **Encontrando el valor ideal de n**

Una forma para encontrar el valor ideal de n que maximice la disponibilidad para dados valores de λ_{in} y otros parámetros del modelo, consiste en evaluar A en la ecuación:

$$A = \sum_{i=1}^k P(i,0) = \frac{n + c}{(1 + e) * n + c + b * f + c * e + c * e * g}$$

Para todos los posibles valores de n , para $n \in [1, k]$. El valor ideal de n es correspondiente al máximo valor de la disponibilidad (A).

Ejemplo 3.- Empleando, nuevamente, el ejemplo del motor de la locomotora, se tienen los siguientes datos:

$$k=7; \lambda_d = 0.001; \mu_{in} = 0.5; \mu_m = 0.05; \mu_d = 0.01 \lambda_{in} = 0.005$$

Establecer cuál es el valor ideal de n , $n \in [1,7]$; que maximice la disponibilidad del activo.

$$f = 0.7; e = 0.01; g = 10; a = 0.583$$

Con respecto al ejemplo 1, únicamente, varían los valores de b y c .

$$b \equiv a^{k-n}$$

$$c \equiv a * \frac{1-b}{1-a}$$

Del **ejemplo 1** se sabe que para $n = 4$, la disponibilidad es de **0.9443**. Con respecto, a los otros valores de n y su correspondiente valor de la disponibilidad se muestran en la tabla 4.15. A continuación se da una muestra de cálculo de b y c :

Para $n = 1$

$$b \equiv a^{k-n} = (0.583)^{7-1} = 0.0394$$

$$c \equiv a * \frac{1-b}{1-a} = 0.583 * \left(\frac{1-0.0394}{1-0.583} \right) = 1.3448$$

Tabla 4.15.- Simulación de la disponibilidad para distintos valores de n .

n=1	n=2	n=3	n=4	n=5	n=6	n=7
b=0.039	b=0.0675	b=0.1158	b=0.198	b=0.3403	b=0.583	b=1
c=1.345	c=1.3054	c=1.2379	c=1.121	c=0.9236	c=0.583	c=0
A=0.9267	A=0.940	A=0.9449	A=0.9443	A=0.9383	A=0.9252	A=0.9009

Analizando los resultados obtenidos se tiene que para $n = 3$, el valor de disponibilidad alcanza su máximo. Por tanto, si se desea obtener la mayor disponibilidad del motor diesel de la locomotora, la degradación del mismo, no puede

exceder del tercer grado (ver tabla 2.1 cap 2.) que representa una degradación entre el 26 y 40%.

- **Encontrando , simultáneamente, el valor ideal de n y λ_{in}**

Una forma de solucionar este problema es encontrando el valor ideal de λ_{in} y el correspondiente valor de la disponibilidad (A) para todos los posibles valores de $n \in [1, k]$, y seleccionando el mejor par.

Ejemplo 4.- Considerando, igualmente, el ejemplo del motor de la locomotora, se tienen los siguientes datos:

$$k=7; \lambda_d = 0.001; \mu_{in} = 0.5; \mu_m = 0.05; \mu_d = 0.01$$

Establecer cuáles son los valores ideales de n y λ_{in} que maximicen la disponibilidad del activo.

Para solucionar este problema se determinan los valores de λ_{in} mediante el programa desarrollado en Maple para todos los posibles valores de n . En la tabla 4.16 se muestran los valores de λ_{in} para distintos valores de n .

Tabla 4.16.- Simulación de λ_{in} para distintos valores de n .

	n =1	n = 2	n =3	n =4	n = 5	n = 6
λ_{in}	0.00285	0.00436	0.00586	0.007363	0.00894	0.00952

A continuación, la aplicación del programa para calcular unos de los valores de λ_{in} correspondientes al $n=2$.

```
> with(LinearAlgebra):
> k:=7.:
> n:=2.:
> lambda:=0.001:
> mud:=0.01:
> mum:=0.05:
> muin:=0.5:
```

```

>
lambdaU1:=(lambdad*muin)/(mud):f:=(k*lambdad)/mud:h:=mud/
mum:r:=k*lambdad/muin:s:=muin*(k-n)*(f-f*h-
r):T:=n*k*lambdad:q:=k-
n+1.:U:=(s/T)^(1/q):lambdaU2:=k*lambdad*(U-1.):
> if (lambdaU1<lambdaU2) then;
> lambdaU=lambdaU1;
> elif (lambdaU1>lambdaU2) then;
> lambdaU:=lambdaU2;
> end if:
>
lambdaU:e:=lambdain/muin:w:=(k*lambdad+lambdain):a:=(k*la
mbdad)/w:E:=k-n:b:=a^E:H:=(1-b)/(1-
a):c:=a*H:C:=(k*lambdad+lambdain):bb:=-
(E*b)/C:X:=n+c:A:=(k*lambdad*bb+c):XX:=(-
1./lambdain)*A:Y:=n*e+b*f+(1.-b)*r+(1.-
b)*f*h:YY:=(n/muin)+bb*(f-f*h-
r):lambdaL:=0:Digits:=10:Tol:=10.^(-5):F:=Y*XX-X*YY:plot
(F(lambdain),lambdain=lambdaL..lambdaU);fsolve({F},{lambd
ain},lambdaL..lambdaU);

```

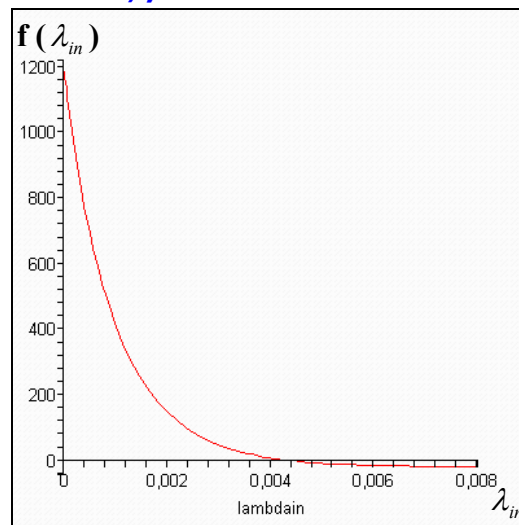


Figura 4.13.- Gráfica de la función $f(\lambda_{in})$ para $n=2$ obtenida del MAPLE 9.5.

Luego, con los valores de n y su correspondiente valor de λ_{in} se determinan la disponibilidad para cada caso, resultando los valores mostrados en la tabla 4.17:

Tabla 4.17.- Simulación de la disponibilidad para distintos valores de λ_{in} y n.

	n =1	n = 2	n =3	n =4	n = 5	n = 6
λ_{in}	0.00285	0.00436	0.00586	0.007363	0.00894	0.00952
A	0.9317	0.9403	0.9452	0.9460	0.9417	0.9278

Entonces, para $n = 4$ se obtiene el valor de λ_{in} que arroja el mayor valor disponibilidad. Comparando este resultado con el obtenido en el **ejemplo 3**, para $n= 3$ correspondía el mayor valor de disponibilidad, $A=0.9449$; en ese caso, se buscaba el valor de n para un valor constante de λ_{in} . Por el contrario, en este ejemplo, el cálculo de la disponibilidad se efectúa variando obtenidos los valores de n y λ_{in} , los cuales, son lo valores considerados ideales.

4.2 Aspectos relevantes de la estimación de las frecuencias de mantenimiento preventivo empleando las distintas metodologías.

4.2.1 Aspectos relevantes de la estimación de frecuencias basados en los históricos de fallas

Los registros históricos de fallas resultan una herramienta útil para la planificación de las actividades de mantenimiento, puesto que, permiten alcanzar una intervención oportuna de los activos basados en el comportamiento real del equipo a lo largo del tiempo. Sin embargo, en la mayoría de los casos, en las organizaciones no cuentan con registros confiables donde queden asentadas de forma veraz y efectiva las distintas fallas ocurridas, esto se debe, a que no se ha creado la conciencia dentro del personal de la importancia de mantener un archivo completo del funcionamiento de los equipos y componentes.

Otro aspecto negativo del uso de los registros para determinar de las frecuencias de mantenimiento lo representa el hecho de que se asienta, únicamente, la falla y no

se le presta la misma atención al modo o los modos que originaron la misma. Por tal razón, los períodos de las actividades de mantenimiento basados en los históricos de fallas no resultan apropiados o no se adaptan al comportamiento real del equipo. Igualmente, si se toma en cuenta, que los activos físicos de una planta sufren modificaciones constantes para mejorar el rendimiento del equipo o para minimizar las actividades de mantenimiento, entonces, la base de datos es pequeña y constantemente cambiante y, en tales circunstancias, los registros de falla no tienen mucha validez.

En la tabla 4.18 se muestran las fortalezas y debilidades del uso de los registros históricos en la determinación de la frecuencia de mantenimiento.

Tabla 4.18.- Fortalezas y debilidades del uso de los registros históricos.

Fortalezas	Debilidades
Permite lograr una intervención oportuna del activo basados en el comportamiento real del mismo.	En la mayoría de las empresas no se cuenta con un registro confiable del comportamiento de los activos.
Es un método sencillo para determinar la frecuencia de las acciones de mantenimiento.	Se acostumbra a registrar la falla pero no se asienta el modo de falla asociado.

Fuente: Propia.

4.2.2 Aspectos relevantes de la estimación de frecuencias basados en confiabilidad.

La distribución de Weibull es un método estadístico altamente efectivo que permite estimar los períodos de intervención del mantenimiento preventivo asociados a una confiabilidad deseada. La estimación de la frecuencia usando esta metodología resulta muy útil cuando según las políticas establecidas de mantenimiento que posee una empresa durante la vida útil de un equipo se deben mantener niveles de

confiabilidad específicos que garanticen contar con equipos disponibles para cumplir con su labor asignada.

En la actualidad, se han desarrollado distintas herramientas computacionales que facilitan el cálculo más preciso de los parámetros de Weibull. Sin embargo, para la obtención de estos parámetros y, por consiguiente, para la estimación de los períodos de intervención de los equipos, se requiere de información confiable y veraz proveniente de los históricos de funcionamiento de un componente o equipo.

Si la información que se tiene no esta en coherencia con la realidad operacional del equipo, se debe tener por sentado, que los períodos de mantenimiento estimados resultarán inadecuados, lo cual, se verá reflejado en el rendimiento, la disponibilidad y la confiabilidad de los activos. En la tabla 4.19 se muestran tanto las fortalezas como las debilidades de emplear este método en la planificación de las actividades de mantenimiento.

Tabla 4.19.- Fortalezas y debilidades de la estimación de la frecuencia basados en la confiabilidad.

Fortalezas	Debilidades
Se emplea un método estadístico altamente efectivo para determinar los períodos de mantenimiento, como lo es, distribución de Weibull.	Se requiere de información confiable y veraz proveniente de los históricos de fallas de los equipos.
La frecuencia determinada usando este método permite mantener niveles de confiabilidad específicos de los activos durante su vida útil.	La planificación de las actividades de mantenimiento se hace sin tomar en cuenta los modos asociados a las fallas.
Se cuenta con herramientas computacionales aplicadas al cálculo de los parámetros de Weibull.	Se limita al estudio de componentes de equipos.

Fuente: Propia.

4.2.3 Aspectos relevantes de la estimación de frecuencias usando modelos propuestos por Barlow y Hunter (políticas de mantenimiento I y II).

La política I es adecuada para un equipo sencillo; en el caso de la política II, es apropiada para equipos complejos. Entonces, basado en lo anterior, emplear un modelo u otro dependerá de las características de los equipos bajo estudio.

Si se quiere hacer una programación de las actividades de mantenimiento que permita reducir los costos totales esperados de dichas labores, ambas políticas resultan útiles, puesto que, al momento de hallar el intervalo de mantenimiento se incorporan los costos asociados tanto al mantenimiento preventivo como el correctivo y permiten establecer la mejor relación entre los gastos y los beneficios.

Estos modelos se basan en dos suposiciones, en un extremo está la suposición de tan malo como viejo, que significa que la tasa de fallas no se reduce con reparaciones mínimas. En el otro extremo está la suposición de tan bueno como nuevo, lo cual significa que el equipo se restablece a una condición de nuevo después del mantenimiento preventivo. Sin embargo, en la mayoría de las situaciones del mundo real, todos los tipos de mantenimiento pueden mejorar el estado del equipo hasta un nivel entre dos extremos y, en ocasiones, podría quedar peor que antes del mantenimiento debido a procesos deficientes. La tabla 4.20 se exponen los aspectos positivos y negativos de estos modelos en la estimación de la frecuencia.

Tabla 4.20.- Fortalezas y debilidades de las políticas I y II.

Fortalezas	Debilidades
Se incorporan los costos asociados a las actividades preventivas y correctivas.	Requiere que sean determinados los costos asociados a las actividades del mantenimiento preventivo y correctivo.
Incluyen dentro del estudio la confiabilidad del equipo.	Requiere de gran cantidad de data.
Permite determinar el tiempo para realizar el mantenimiento preventivo que minimice el costo total esperado, permitiendo una planificación costo-efectiva de las mismas.	Se basan en suposiciones, como son, “tan malo como viejo” y “tan bueno como nuevo”.

Fuente: Propia.

4.2.4 Aspectos relevantes de la estimación de frecuencias basados en el Mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC).

El MCC es una herramienta que permite dar una respuesta eficaz a las demandas de refuerzo de seguridad, confiabilidad, salvaguarda del medio ambiente y en el ámbito económico. En esta técnica, los intervalos de mantenimiento están basados en la condición y rendimiento de los equipos para aprovechar su máximo la vida útil. Parte esencial de esta metodología, es que los requerimientos de mantenimiento de un equipo se establecen de acuerdo a las consecuencias de cada falla y los mecanismos de falla responsables de estas fallas.

Para la aplicación eficaz de esta metodología se requiere de toda la información relacionada con el funcionamiento de los activos, el número de activos, sus funciones, los modos de fallas y sus consecuencias; además, se debe contar con información referente a los planes y programas del mantenimiento preventivo y del correctivo existentes. Adicionalmente, se debe contar con datos relacionados con los costos de las actividades de mantenimiento, puesto que, se busca lograr una intervención costo-

efectiva de los equipos. Igualmente, el análisis de MCC debe ser realizado por personas con amplios conocimientos en el área.

En la tabla 4.21 se hace referencia a las fortalezas y debilidades relacionadas con la estimación de frecuencia usando este método.

Tabla 4.21.- Fortalezas y debilidades de la estimación de la frecuencia basados en el MCC.

Fortalezas	Debilidades
Los intervalos de mantenimiento se basan en la condición del activo, permitiendo aprovechar al máximo su vida útil.	La detección de la condición de falla potencial depende de la selección del mecanismo de diagnóstico adecuado.
Se consideran las consecuencias y los mecanismos de cada falla.	Para su aplicación eficaz se requiere de gran cantidad de data sobre los activos.
Permite lograr una intervención costo-efectivas de las actividades de mantenimiento.	Se debe determinar el intervalo PF para cada modo de falla estudiado.
Este método permite planificar las tareas de mantenimiento, con el fin, de reducir la probabilidad de ocurrencia de las fallas mediante el monitoreo continuo del rendimiento del equipo.	El estimar la frecuencia usando el intervalo PF tiene los siguientes inconvenientes: <ul style="list-style-type: none"> ▪ No se posee suficiente data para construir una curva para cada modo de falla. ▪ La curva varía si es afectada por factores externos tales como variaciones en el contexto operativo, fallas operacionales y deficiencias relacionadas con ingeniería y mantenimiento.

Fuente: Propia.

4.2.5 Aspectos relevantes de la estimación de frecuencias usando el análisis de costo- riesgo- beneficio (ACRB).

Empleando esta metodología se logra establecer las frecuencias de de mantenimiento que permiten soportar la toma de decisiones y a su vez, minimizar los

costos directos e indirectos relacionados con la actividad, incrementando la disponibilidad operacional y la confiabilidad de los activos, llegando hasta direccionar los recursos y esfuerzos hacia áreas específicas donde así lo requieran.

La dificultad de esta técnica, se centra en el modelaje de la curva del riesgo, ya que, se debe estimar la probabilidad de falla y las consecuencias. Es necesario, identificar todos y cada uno de los peligros presentes en una instalación industrial y después conocer la frecuencia con la que ocurrirá un evento y la magnitud del daño que se producirá. Esta tarea resulta costosa en términos de tiempo y recursos a emplear. De hecho, se han tenido que desarrollar un gran número de metodologías encaminadas a su estimación más o menos precisa. En la tabla 4.22 se muestran las fortalezas y debilidades de esta metodología.

Tabla 4.22.- Fortalezas y debilidades del ACRB.

Fortalezas	Debilidades
Permite incluir en el estudio los riesgos asociados a las consecuencias que generan los distintos modos de fallas.	La dificultad de esta técnica se centra en la estimación o modelaje de la curva de riesgo
Se puede establecer un balance entre lo que se gasta y los beneficios esperados.	Para su aplicación eficaz se requiere de gran cantidad de data de los costos y riesgos.
Permite alcanzar una intervención oportuna y costo-efectiva de los activos.	Para determinar la probabilidad de falla y las consecuencias de falla se emplean modelos matemáticos y datos estadísticos, pero se requiere del juicio experto para validar los resultados

Fuente: Propia.

4.2.6 Aspectos relevantes de la estimación de la frecuencia de inspección de Mantenimiento Predictivo.

Esta técnica de estimación ofrece un método sencillo para estimar la frecuencia de las inspecciones predictivas tomando en cuenta la relación riesgo - costo -

beneficio y justificando así, las decisiones del gerente del área de mantenimiento, en lo concerniente al impacto de las estrategias en el presupuesto de gastos de fábrica.

Las políticas de mantenimiento predictivo resultan una herramienta eficiente para detectar las fallas en sus etapas incipientes, evitando así, que estas se manifiesten durante su operación y que ocasionen paros de emergencia y tiempos muertos generando un impacto financiero no deseado.

Para implementar un programa de mantenimiento predictivo, en forma efectiva, es necesario establecer en que equipos se justifica la implementación del mismo, tanto técnica como económicamente. Igualmente, se debe tener un amplio conocimiento de las distintas técnicas de diagnóstico disponibles y, en función, de sus ventajas y limitaciones, seleccionar la más adecuada y factible económicamente. Por último, contar con un equipo de personas capacitadas y competentes en la aplicación de las técnicas de diagnóstico. En la tabla 4.23 se muestra estos aspectos positivos y negativos en forma tabulada.

Tabla 4.23.- Fortalezas y debilidades del método de estimación de la frecuencia de las inspecciones predictivas.

Fortalezas	Debilidades
Es un método sencillo para determinar la frecuencia de las inspecciones predictivas.	Se requiere de gran cantidad de información sobre las técnicas de diagnóstico existentes.
Esta basado en la relación costo-riesgo, lo cual, permite una planificación costo-efectiva de las actividades.	Es recomendable para valores de la rata de fallas (λ) menores que 1; $\lambda < 1$
Se basa en el mantenimiento predictivo, herramienta eficiente para detectar las fallas en sus etapas incipientes.	La necesidad de un personal altamente calificado generan un alto costos en Horas- Hombre inicial.

Fuente. Propia.

4.2.7 Aspectos relevantes de la estimación usando las cadenas de Markov (modelo del MBC).

Diversos estudios realizados por diferentes industrias han concluido que, en la mayoría de los casos, la falla de un equipo no está relacionada directamente con su antigüedad, por el contrario, las fallas son causadas por eventos o condiciones que ocurren durante la operación y procesos de manufactura de la pieza o componente. Por lo tanto, las decisiones ideales del mantenimiento deberían estar basadas en la condición de deterioro de las piezas o componentes. Por esta razón, modelos como el planteado en esta investigación, basados en la realización de inspecciones periódicas para revelar la condición de deterioro de un equipo, facilitan la toma de decisiones y permiten lograr una planificación más precisa de las acciones preventivas.

Los procesos de decisión involucrados con el mantenimiento son estocásticos por naturaleza, debido a la gran cantidad de factores ambientales de carácter incierto que afectan la duración de la vida de servicio y la variabilidad inherente de cada equipo. Igualmente, cuando se incluye la subjetividad humana en la determinación de estados y condiciones. Las Cadenas de Markov son un modelo matemático que de forma explícita permiten incorporar estos elementos de incertidumbre e imprecisiones dentro de la toma de decisiones, especialmente si el sistema involucra probabilidades y subjetividad humana.

El procedimiento planteado en el modelo referido en este trabajo, es altamente probabilístico, caracterizado por la complejidad de las ecuaciones empleadas para obtener los parámetros de mantenimiento. Para la efectiva aplicación de este modelo es necesario, identificar los mecanismos y causas de las fallas y la selección de métodos de detección consistentes con lo que se desea medir.

El modelo se basa en inspecciones periódicas que revelan perfectamente el estado del equipo y, según sea el nivel de deterioro del mismo, se realiza una acción de mantenimiento preventivo o ninguna acción es llevada a cabo. En caso de falla, se efectúa un mantenimiento correctivo. Cabe destacar, que tanto el mantenimiento preventivo como el correctivo retornan al activo a una etapa de tan bueno como nuevo. En la figura 4.24 se exponen tanto las fortalezas como las debilidades del uso de este modelo del MBC en la planificación de las acciones de mantenimiento.

Tabla 4.24.- fortalezas y debilidades del modelo del MBC.

Fortalezas	Debilidades
El modelo se basa en el monitoreo de la condición de los equipos o componentes.	Es un método altamente probabilístico, caracterizado por la complejidad de sus ecuaciones.
Permiten lograr una planificación más precisa de las actividades preventivas.	Para su efectiva aplicación se necesita identificar cada uno de los mecanismos y causas de las fallas.
Se basa en la realización de inspecciones periódicas para revelar las condiciones de degradación de un activo	Es necesario seleccionar un método de detección consistente con lo que se desea medir.
Evita la ejecución de actividades de mantenimiento innecesarias, es decir, se inicia alguna acción de mantenimiento cuando así se requiera.	Se hace la suposición que tanto el mantenimiento preventivo como el correctivo, retornan al equipo a la condición de “tan bueno como nuevo”.

Fuente: Propia.

4.3 Desarrollo del Modelo

El modelo propuesto está diseñado para determinar la frecuencia, ya sea, de inspección o ejecución de las tareas de mantenimiento preventivo de los equipos **rotativos** dentro de una instalación industrial. Entonces, dependiendo si las

actividades de mantenimiento estén basadas en el tiempo o uso del equipo o, en caso contrario, se basan en el monitoreo de las condiciones del mismo, en el modelo desarrollado, se definen varios métodos de estimación que permiten alcanzar una intervención oportuna de los equipos.

A continuación, se presentan las distintas etapas llevadas a cabo para el desarrollo del modelo, cuyo objetivo final, es la estimación de las frecuencias de las actividades de mantenimiento preventivo.

4.3.1 Etapa previa.- Conformación del equipo natural de trabajo (ENT)

Para la aplicación efectiva de las distintas etapas que conforman el modelo desarrollado se sugiere la conformación de un **equipo natural de trabajo**, de forma tal, de que las personas que lo conformen sean las encargadas de recopilar la información necesaria, analizarla, seleccionar la metodología para la jerarquización de los activos de la organización, definir el método de estimación a ser aplicado, determinar las nuevas frecuencias, elegir los indicadores para proceder a hacer la evaluación del comportamiento y rendimiento de los equipos al ser implementadas dichas frecuencias.

Un equipo natural de trabajo es un grupo multidisciplinario que pertenecen a una organización y trabajan en conjunto durante un período de tiempo para solucionar problemas específicos con ayuda del valor agregado que suministra cada miembro para mejorar la gestión a corto plazo.

Es de suma importancia, que se integren al grupo, toda aquella persona involucrada con la operación y el mantenimiento de los activos e, igualmente, especialistas en procesos, analistas de mantenimiento, planificadores, en fin, todo

aquel que aportar conocimientos sobre el comportamiento y funcionamiento de los equipos bajo estudio. Para alcanzar el éxito de las metas trazadas con la conformación de este equipo de trabajo se debe nombrar un facilitador, preferiblemente alguien ajeno a la organización, para que sea el encargado de coordinar y supervisar el trabajo que se lleva a cabo.

4.3.2 Etapa I.- Recopilación de información sobre los equipos

Constituye una fase esencial del proceso para la estimación de las frecuencias de las actividades de mantenimiento preventivo, ya que, la aplicación de una metodología de estimación en particular depende, fundamentalmente, de la data disponible.

La información a recopilar se define en la tabla 4.25 y esta servirá de base al posterior análisis. Esta información está relacionada con las características, condiciones de operación y el mantenimiento de los equipos y sistemas. Igualmente, se hace referencia a los medios o fuentes alternativas que se pueden consultar para recabar la información cuando esta no se encuentre disponible dentro de la organización.

Tabla 4.25.- Información a recopilar durante la primera etapa del modelo

	INFORMACIÓN A RECOPIRAR	OBSERVACIONES
RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Manuales de operación de los equipos. ▪ Planos de la planta. ▪ Sistemas y equipos que conforman la planta. ▪ Programas y planes de mantenimiento preventivo y correctivo. ▪ Datos del comportamiento histórico de los equipos. ▪ Características de diseño y modificaciones a que hayan sido sometidos los equipos. ▪ Condiciones específicas de operación de los sistemas y equipos. ▪ Métodos o procedimientos de trabajo. 	<p>Si hay ausencia de la información requerida:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entrevistas al personal experimentado de la planta (ingenieros, supervisores, capataces). Pueden realizarse individual o grupalmente a expertos de una disciplina en particular. • Observación los equipos durante su funcionamiento e, igualmente, durante los paros para mantenimiento, para así, establecer en forma directa, el estado del equipo, el sitio donde se ubica y en que condiciones opera. • Otra forma de obtener la información de los equipos es consultando al fabricante e, igualmente, a partir del comportamiento de equipos similares.

Fuente: Propia.

Es importante incluir información sobre las regulaciones y obligaciones sobre la seguridad y protección del medio ambiente. También, se puede incluir información referente a la experiencia del personal y capacitación.

4.3.3 Etapa II.- Análisis de la información recopilada

Completada la fase de recopilación de la información relacionada con los equipos y su funcionamiento, se puede iniciar la etapa de análisis. Esta etapa tiene varios objetivos por cumplir, los cuales, se exponen en la tabla 4.26.

Tabla 4.26.- Objetivos del proceso de análisis.

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN RECOPIADA	OBJETIVOS DEL ANÁLISIS
	1.- Estudiar el comportamiento de los equipos para establecer: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Condiciones específicas de operación. ▪ Funciones que cumplan cada equipo. ▪ Equipos que fallan con mayor frecuencia y cuya falla representan mayor impacto al proceso productivo. ▪ Fallas de mayor impacto o las que tienen mayor frecuencia de aparición. ▪ Causas de las fallas y las posibles medidas que se hayan tomado para minimizar su ocurrencia. ▪ Demoras por fallas o eventos no deseados.
	2.- Examinar los planes y programas de mantenimiento existentes: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tipos de tareas de mantenimiento. ▪ Efectividad de las tareas en detectar fallas. ▪ Frecuencia utilizada.
	3.- Verificar el cumplimiento de las actividades programadas a la frecuencia establecida. Igualmente, identificar los paros de mantenimiento y, por último, estudiar las desviaciones presentadas.
	4.- Analizar los métodos de trabajo y chequear si están incluidas todas las actividades de mantenimiento que se deberían haber realizado.
	5.- Establecer si las modificaciones hechas a los equipos resultaron efectivas, comparando el rendimiento antes y después de los cambios.

Fuente: Propia.

4.3.4 Etapa III.- Jerarquización de los equipos

Con el objetivo de direccionar los esfuerzos y recursos hacia las áreas donde sea más importante y necesario se debe proceder a jerarquizar los equipos dentro de la planta en función del impacto que generan. Esto se traduce, en un prioritización de los planes de mantenimiento preventivo o correctivo e, igualmente, de los programas de inspecciones. La jerarquización de los equipos permite dividirlos en tres categorías: no críticos o de baja criticidad, semi- críticos o de mediana criticidad y críticos o de alta criticidad, como se muestra en la figura 4.14.

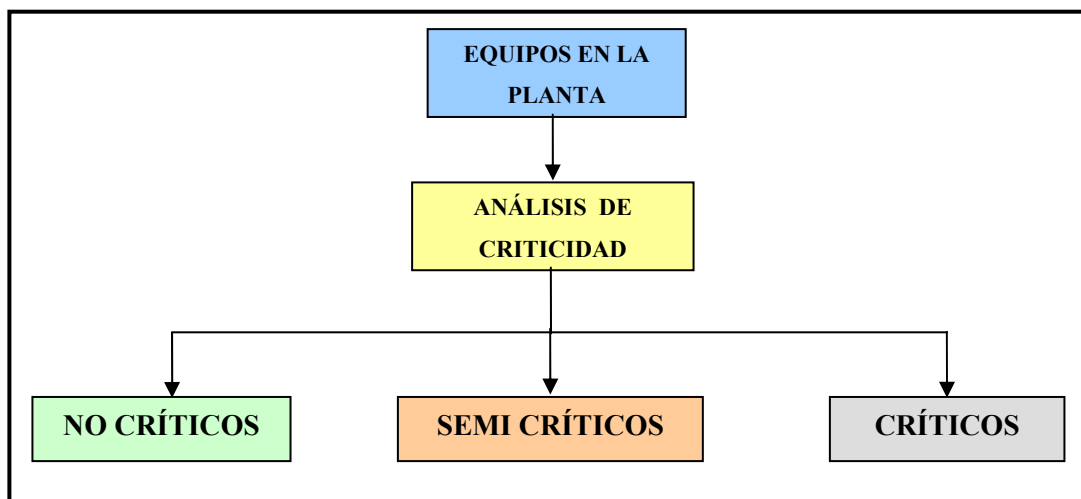


Figura 4.14.- Jerarquización de los equipos de una planta.

Fuente: Propia.

Existen diferentes métodos que se pueden emplear para realizar un estudio destinado a establecer la criticidad de los equipos de una planta, entonces, seleccionar el método que se adapte a las políticas y estrategias de mantenimientos de la empresa y al contexto operacional de los equipos será responsabilidad del personal asignado para tal tarea. Para establecer la criticidad se sugiere la aplicación de la **metodología D.S**, la cual, fue desarrollada por el profesor Diógenes Suárez.

Este es un método basado en varios criterios de evaluación adaptable a distintos escenarios del contexto operacional de los equipos. Sin embargo, se pueden emplear otros métodos para jerarquizar los equipos según su impacto en el productivo, como son: el principio de Pareto, el método ABC, la matriz de impacto-esfuerzo, la metodología ELECTRE TRI, entre otras. La selección de un método en particular dependerá del contexto y las distintas variables que se deseen evaluar, por tanto, quedará en potestad del equipo natural de trabajo, la elección de la técnica más adecuada.

4.3.5 Etapa IV.- Selección de las metodologías de estimación de la frecuencia del mantenimiento preventivo.

Finalizada la fase de análisis y establecida la jerarquización de los equipos, se inicia la etapa de selección de la metodología a emplear en la estimación de las frecuencias de mantenimiento preventivo. La elección de una técnica en específico dependerá de las estrategias y políticas de mantenimiento propias de cada empresa. Por ejemplo, si las actividades de mantenimiento de un equipo dado se basan en el tiempo o uso del equipo se deberá escoger una metodología asociada a ese tipo de tarea. También, el método escogido debe ser consistente con la data que se tenga de los activos.

➤ Equipos no – críticos

Para los activos físicos clasificados como no críticos o de baja criticidad dentro del proceso productivo se selecciona una política de mantenimiento basado en el fallo, es decir, dejar funcionar hasta que falle y aprovechar al máximo su vida útil, puesto que, resulta más económico reemplazar o reparar el equipo que realizar alguna

actividad de mantenimiento orientado a prevenir que falle. Esta política de mantenimiento se muestra en la figura 4.15.

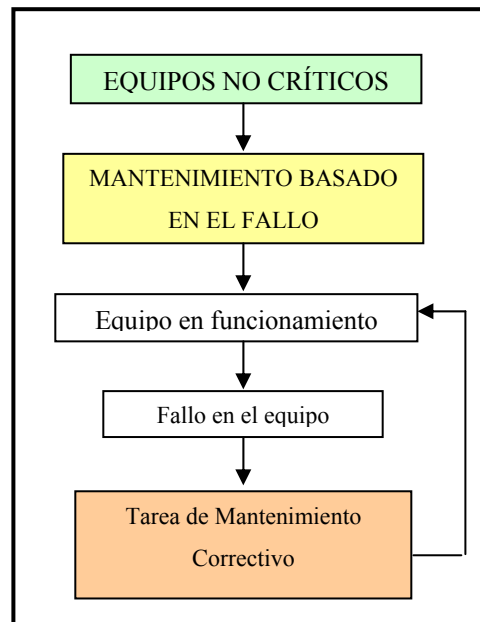


Figura 4.15.- Política de mantenimiento basado en el fallo.

Fuente: Propia.

➤ Equipos semi- críticos

Las nuevas tendencias del mantenimiento moderno se inclinan hacia el **mantenimiento basado en condición (MBC)**, es decir, efectuar la intervención del equipo o componente dependiendo de la condición de deterioro de estos. Por lo tanto, si se toma en cuenta que los equipos semi críticos revisten gran importancia y que si fallan pueden generar un gran impacto dentro del proceso productivo, los esfuerzos de mantenimiento deben estar orientados a minimizar la ocurrencia de fallas que afecten su rendimiento y, al mismo tiempo, aprovechar al máximo su vida útil. Entonces, se recomienda al momento de determinar la frecuencia de las acciones

destinadas a mantener estos equipos en condiciones operativas emplear el **método de estimación basado en el MCC**.

Puesto que, esta metodología basándose en la condición del activo permite alcanzar una planificación efectiva de las tareas que se caracterice por intervenir el equipo cuando sea realmente necesario. Igualmente, incorporan dentro del análisis, las consecuencias generadas por el modo de falla bajo estudio, lo cual, permite planificar las actividades no sólo, en función, de contrarrestar la aparición de una falla sino, con el fin, de minimizar el impacto a la seguridad, el medio ambiente, las operaciones y la economía de la organización.

Adicionalmente, esta herramienta de estimación, ya que, existen casos en que el mantenimiento no puede basarse en la condición o, ya sea, que no resulta costo-eficiente realizar alguna tarea en condición, define otro tipo de tarea basada en el tiempo, **la tarea en tiempo límite**, que se basa en el nivel de desgaste o en la edad del activo en la que se demuestre que resulta beneficioso reemplazar o restaurar un activo para lograr una menor probabilidad de falla. Los intervalos de estas tareas se establecen, comúnmente, empleando el análisis de Weibull, análisis de fatigas o los resultados de ensayos de ingeniería. Estos intervalos se pueden definir según un límite de operación segura para evitar la aparición de cualquier falla que pueda afectar la seguridad y el medio ambiente y, de acuerdo, a un límite de costo-eficiente para aprovechar al máximo la vida útil del activo.

➤ **Equipos críticos**

Los equipos jerarquizados como críticos, son todos aquellos que en caso de falla tienen mayor un impacto global dentro del proceso productivo. Este impacto puede estar relacionado a mayores demoras en la producción o en efectos perjudiciales al personal que labora en la organización o al medio ambiente.

Entonces, por su importancia es que el mayor número de recursos y esfuerzos de mantenimiento son dirigidos a minimizar la ocurrencia de eventos no deseados que desemboquen en una falla de los mismos. En el modelo desarrollado se sugieren varias metodologías de estimación que pueden ser aplicadas para la estimación de las frecuencias de inspección o de ejecución de las actividades de mantenimiento. El disponer de varias herramientas de estimación representa una gran ventaja, ya que, ofrece la posibilidad de seleccionar dentro de varias opciones, la técnica más factible con el caso bajo estudio.

Para los equipos críticos, la selección de la metodología a emplear para la estimación de las frecuencias de las actividades del mantenimiento preventivo dependerá del tipo de tarea, es decir, los métodos varían si el mantenimiento del equipo se basa en el tiempo o uso o, por el contrario, se sustenta en el monitoreo de las condiciones. Una tarea de mantenimiento consiste en el conjunto de actividades realizadas a un equipo para mantener su funcionabilidad. Entonces, una tarea basada en el tiempo o en el uso se lleva a cabo de acuerdo con las horas de funcionamiento o un calendario establecido, mientras, que una tarea basada en la condición se centra en la medición de un parámetro que indique deterioro o degradación en el rendimiento del equipo y, una vez, alcanzado el nivel de deterioro máximo permisible, el equipo es sometido a una acción de mantenimiento.

En la figura 4.16 se observan las metodologías para determinar la frecuencia para las actividades de mantenimiento basadas en la condición. Estas técnicas de estimación permiten realizar la intervención del activo cuando sea realmente necesario, es decir, basándose en la condición de desgaste real del mismo.

Dependiendo de la degradación revelada durante la inspección se puede realizar alguna acción destinada a reparar o reemplazar el activo o, en caso contrario, no realizar ninguna tarea y retornarlo a operación. La aplicación del mantenimiento basado en la condición permite aprovechar al máximo la vida útil del equipo e,

igualmente, evitar la aparición de fallas no previstas debidas a tareas innecesarias de mantenimiento.

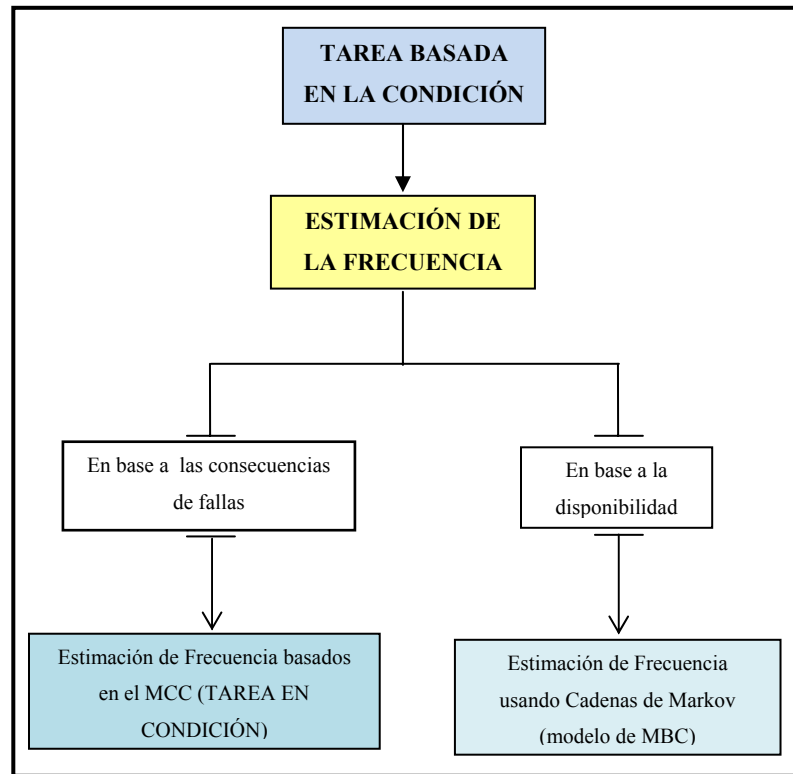


Figura 4.16.- Métodos de estimación para tareas basadas en la condición.

Fuente: Propia.

En la figura 4.17 se presentan los métodos para la estimación de la frecuencia de las tareas de mantenimiento basadas en el tiempo o uso del equipo. El mantenimiento basado en el tiempo se caracteriza por la intervención del activo, independientemente, de la condición del activo.

Este tipo de mantenimiento se debe aplicar cuando resulta factible técnica o económicamente, el reemplazo o reparación a frecuencias fijas.

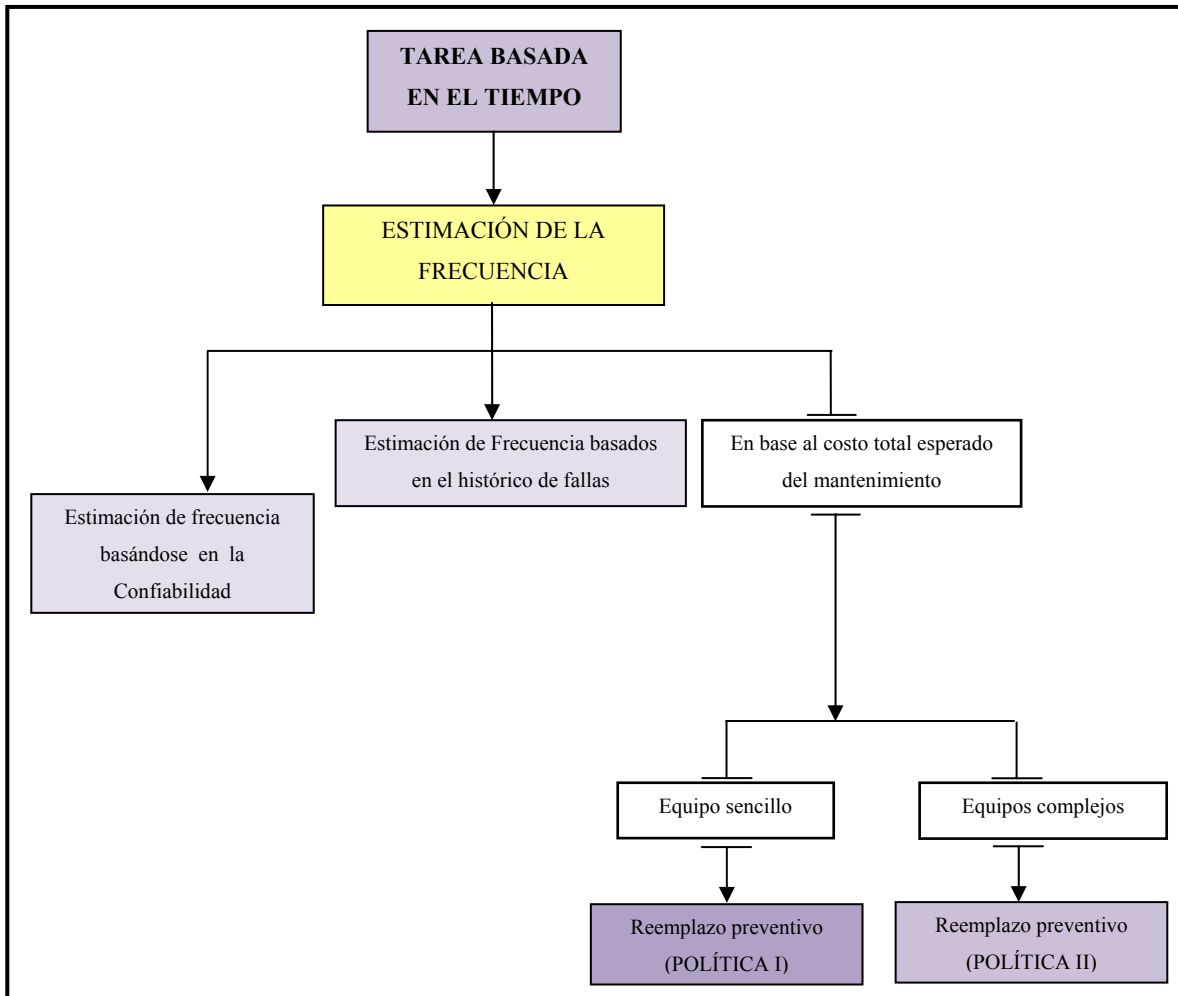


Figura 4.17.- Métodos de estimación para tareas basadas en el tiempo.

Fuente: Propia.

Otra forma para estimar las frecuencias de mantenimiento preventivo, se basa en la programación de las actividades de mantenimiento estableciendo la combinación ideal entre los costos de hacer una actividad y los beneficios que la actividad genera.

También, como parte del análisis se puede llegar a incluir el riesgo asociado a una actividad determinada. En la figura 4.18 se muestran estos métodos de estimación.

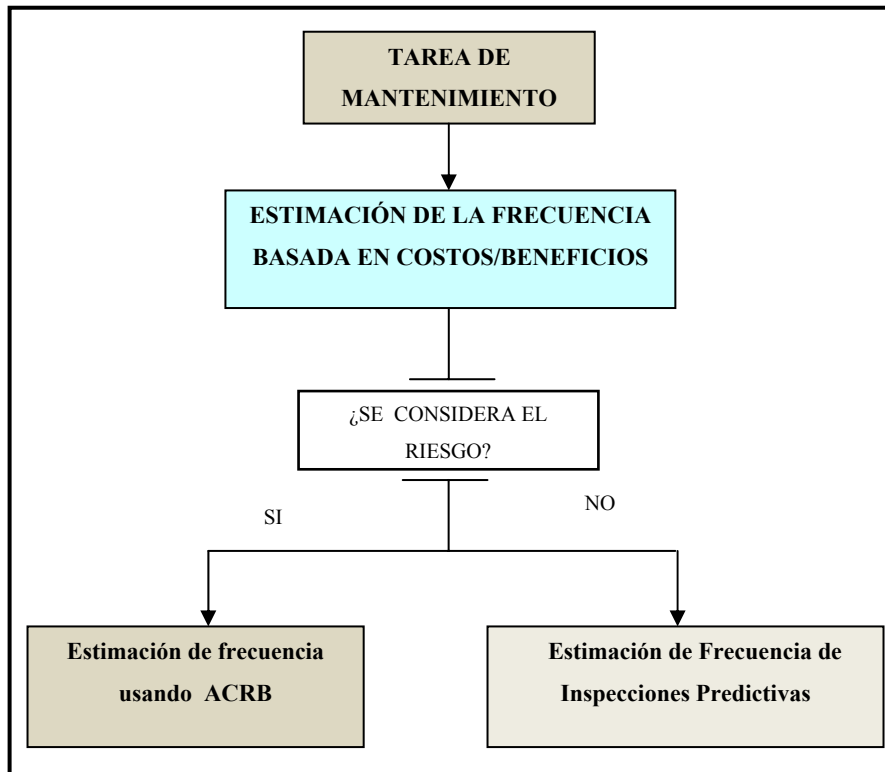


Figura 4.18.- Métodos de estimación basados en la relación costo/beneficio.

Fuente: Propia.

4.3.6 Etapa V.- Estimación e implementación de las nuevas frecuencias del mantenimiento preventivo.

Seleccionado el método de estimación apropiado, se establecen las frecuencias del conjunto de actividades correspondientes al mantenimiento preventivo de los diferentes activos físicos de la planta o instalación industrial bajo estudio. Seguidamente, una vez, determinadas las nuevas frecuencias se deben implementar dentro de los planes de mantenimiento durante un tiempo dado, conocido como **período de estudio** y cuya duración debe ser establecida por el equipo natural de trabajo.

Este intervalo deberá representar el tiempo suficiente para poder hacer un seguimiento y evaluación precisa del funcionamiento y comportamiento de los equipos con los cambios introducidos y que garantice que las decisiones a tomar sean las correctas.

A continuación, en la figura 4.19 se muestra de forma esquemática el modelo desarrollado y las distintas etapas que lo conforman.

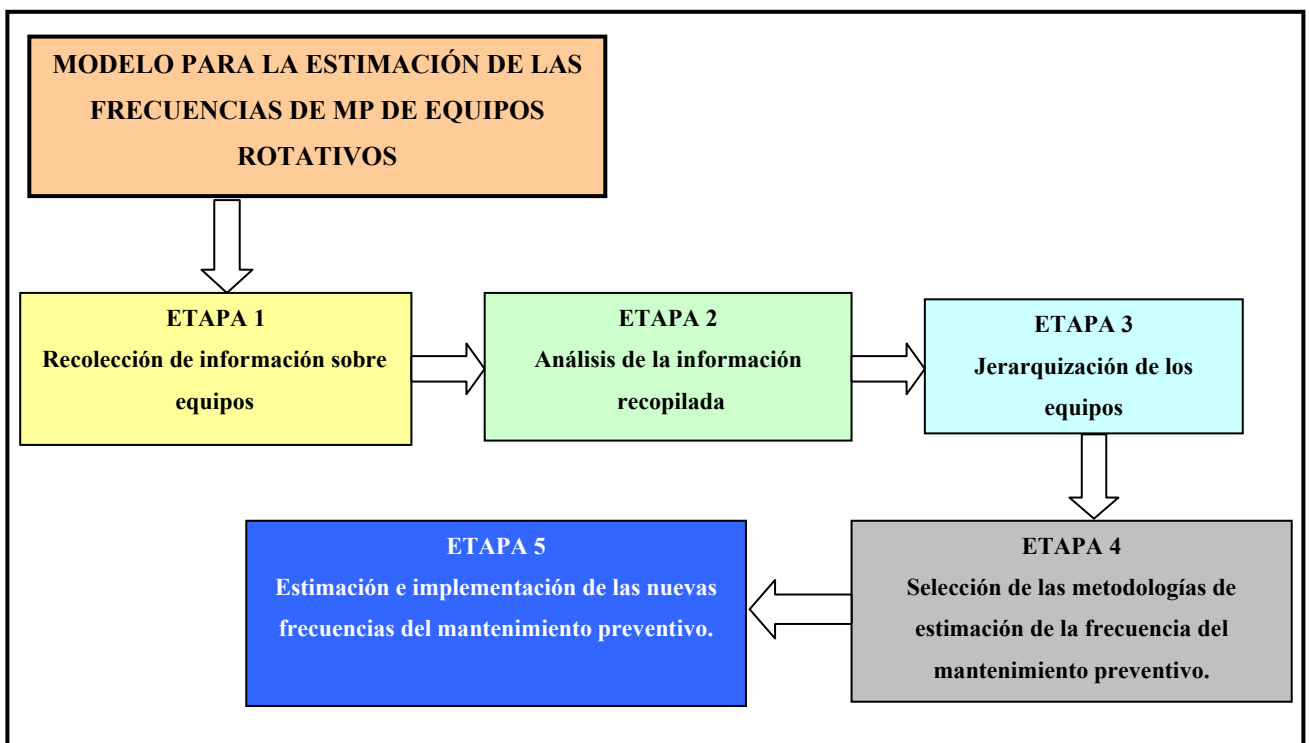


Figura 4.19.- Modelo para la estimación de la frecuencia de mantenimiento.

Fuente: Propia.

En la figura 4.20 se presentan, en forma detallada, en que consisten cada una de las etapas que constituyen el modelo desarrollado y que permitirán la determinación de la frecuencia de inspección o de ejecución de mantenimiento.

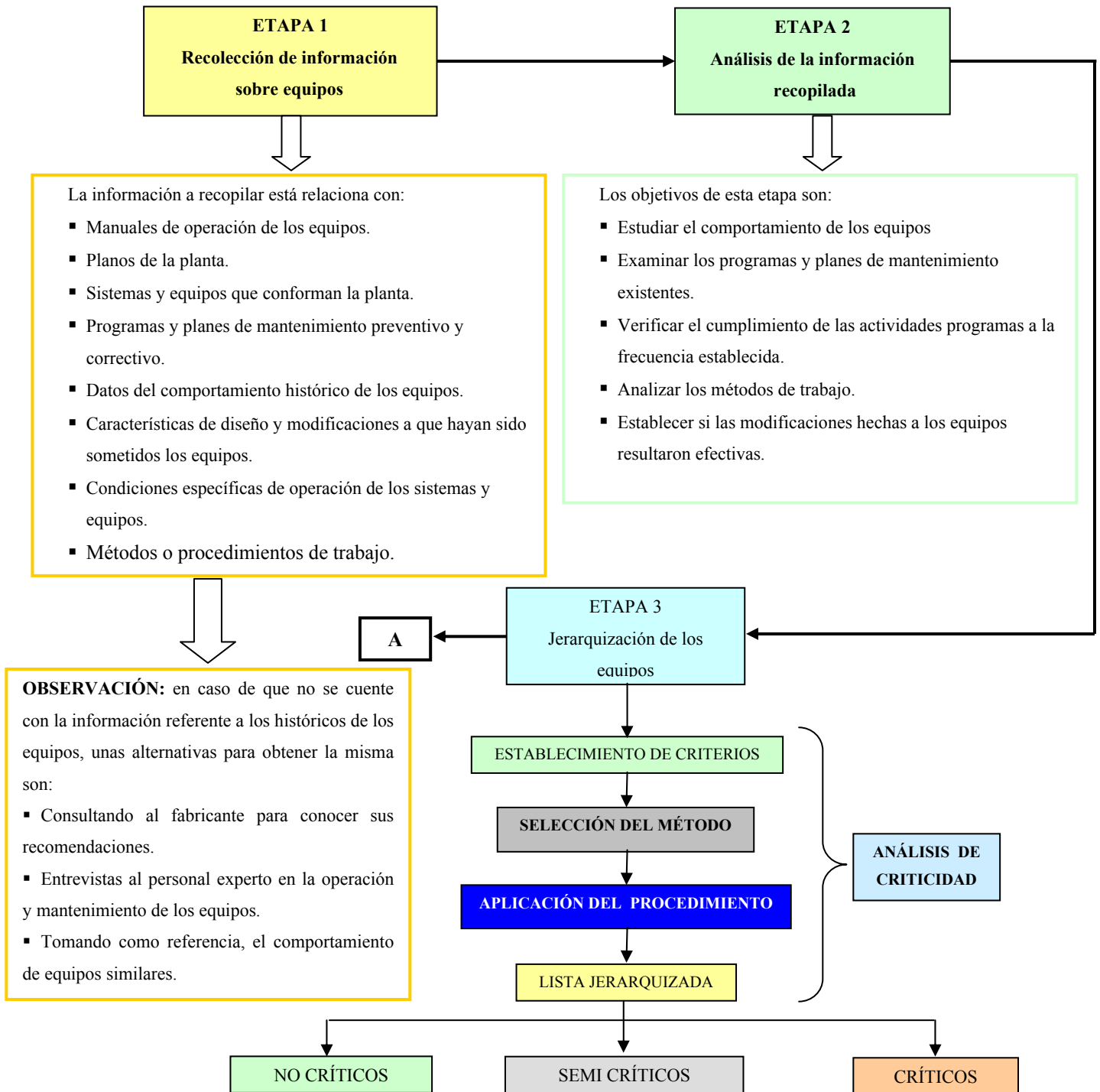


Figura 4.20. Etapas del modelo de estimación.

Fuente: Propia.

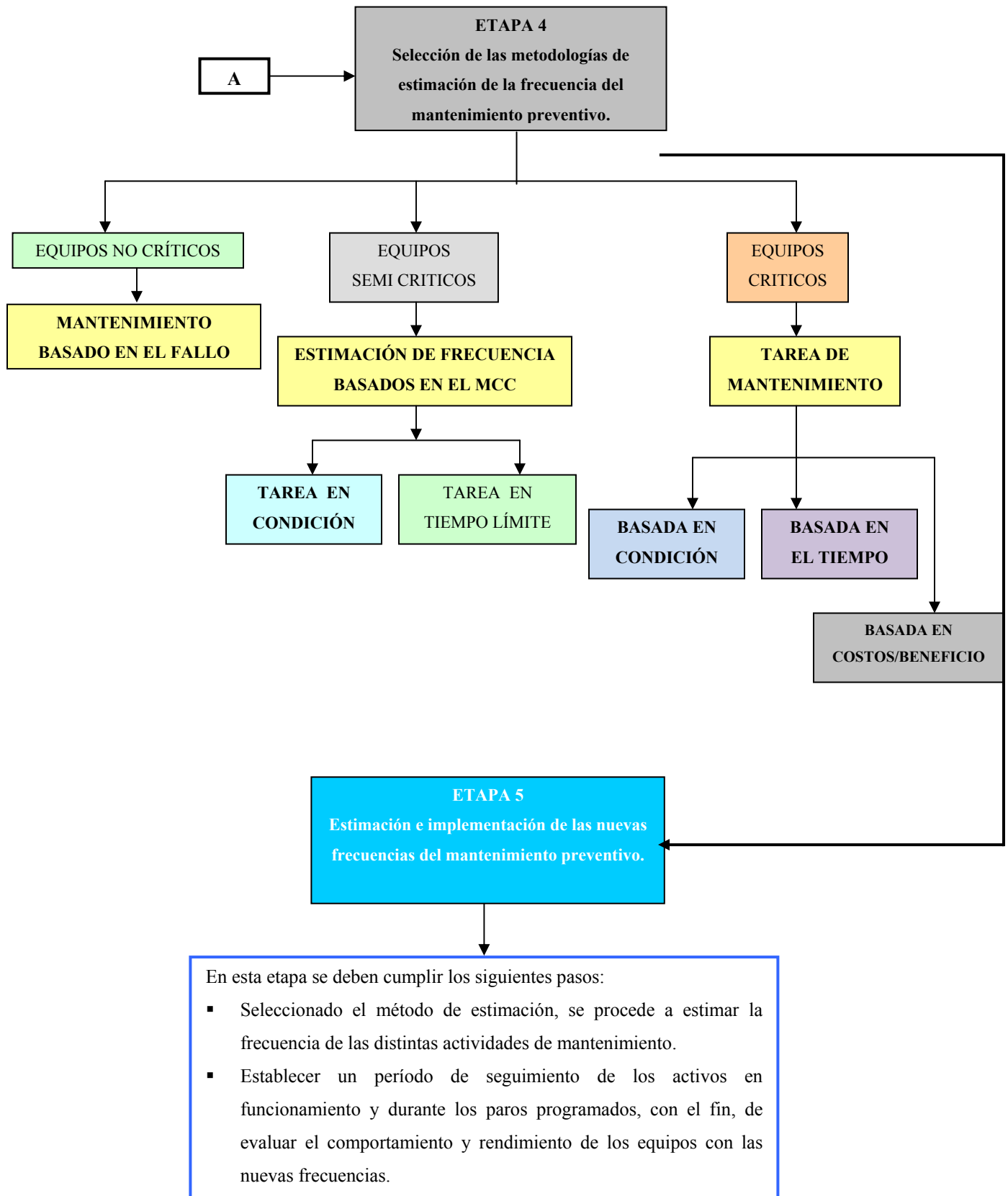


Figura 4.20.- Continuación.

4.4 Formulación de indicadores para la evaluación de la gestión de mantenimiento basados en la aplicación del modelo desarrollado.

Para evaluar la efectividad de los cambios introducidos, en relación, a las nuevas frecuencias de las tareas de mantenimiento preventivo y poder definir si dichas modificaciones podrán ser incluidas de forma permanente, se deberán formular indicadores de gestión de mantenimiento que permitan evaluar el comportamiento y el rendimiento de los equipos a lo largo del tiempo. Igualmente, estos indicadores servirán para identificar las posibles desviaciones y, de existir alguna, tomar las decisiones adecuadas para corregirlas y que conduzcan a la implantación definitiva de las nuevos periodos o intervalos de mantenimiento.

4.4.1 Indicadores de efectividad

La selección de estos indicadores para evaluar la gestión de mantenimiento basados en la aplicación del modelo se debe a que todos permiten reflejar el comportamiento de los equipos a medida que transcurre el tiempo, además permiten medir el cumplimiento de los programas de mantenimiento. Los indicadores de efectividad seleccionados para evaluar los resultados de la aplicación del modelo son:

- **Confiabilidad:**

Es la probabilidad de buen funcionamiento de un equipo durante un tiempo de determinado bajos ciertas condiciones de uso. La confiabilidad individual de equipos industriales, se estima mediante la siguiente expresión:

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

Este indicador permite medir si con las frecuencias de mantenimiento determinadas, la confiabilidad aumenta o disminuye. Si la confiabilidad aumenta, los tiempos entre fallas (TEF) aumentan, es decir, el tiempo durante el cual el activo cumple su función asignada es mayor. En caso contrario, si la confiabilidad disminuye, los TEF disminuyen, por lo cual, el número de fallas aumenta y, con ello, el tiempo fuera de servicio (TFS).

- **Disponibilidad:**

Mide la probabilidad de que un equipo o sistema este disponible para su uso durante un período dado y se expresa mediante la ecuación 4.9:

$$D = \frac{TMEF}{TMEF + MTFS} \quad (\text{Ec. 4.9})$$

Permite establecer si con las nuevas frecuencias de los planes de mantenimiento se puede garantizar la posibilidad de tener activos disponibles para realizar su función cuando así sean requeridos.

- **Efectividad operacional**

Se define como el factor de utilización y mide el aprovechamiento real del equipo para la producción. Este indicador se expresa mediante las ecuaciones 4.10 y 4.11:

$$\text{Efectividad} = \frac{\text{Hrs reales de aprovechamiento del equipo en la producción}}{\text{Hrs disponibles}} \quad (\text{Ec. 4.10})$$

$$\text{Efectividad} = \frac{\text{HrsEfectivas}}{\text{HrsDisponibles}} * 100 \quad (\text{Ec. 4.11})$$

Este indicador permite establecer si los períodos de mantenimiento establecidos son efectivos, en cuanto, al aprovechamiento del tiempo de funcionamiento de los equipos en el proceso de producción.

- **Mantenibilidad:**

Se mide para demostrar si la mano de obra empleada esta realizando su función satisfactoriamente. Haciendo uso de la función de Weibull la mantenibilidad se expresa como:

$$M(t) = e^{-e^{-a(t-\mu)}} \quad (\text{Ec. 4.12})$$

Donde,

a: factor de dispersión,

μ : parámetro de escala.

4.4.2 Indicadores claves de rendimiento (KPI)

Estos indicadores permiten hacer un seguimiento del rendimiento establecido en contra de factores claves del éxito. Están directamente vinculados a los objetivos generales de la empresa; estos objetivos determinan las actividades esenciales que deben hacerse bien para que una determinada operación resulte exitosa. Los indicadores seleccionados son:

- **Inspección eficaz preventiva (IPF)**

Es una proporción de horas- hombre de reparación preventivas a horas- hombre preventivas de inspección. Este indicador se calcula usando la ecuación 4.13:

$$IPF = \frac{H - H_{\text{reparaciones preventivas}}}{H - H_{\text{inspección preventiva}}} \quad (\text{Ec. 4.13})$$

Donde,

H-H de reparación preventivas: son el mantenimiento que es realizado como consecuencia de una inspección preventiva.

H-H de reparación preventivas de inspección: es el trabajo que proviene de estrategias de mantenimiento de equipos, esto es, servicios planificados e inspecciones.

Este indicador permite evaluar si las inspecciones preventivas a una frecuencia dada resultan eficaces en la detección de fallas o eventos no deseados que originan, en consecuencia, alguna actividad preventiva.

▪ **% de Cumplimiento Previsto (%CP):**

Una medida o indicador del cumplimiento previsto y se determina mediante la ecuación 4.14:

$$\%CP = \frac{H - H_{previstas\ completadas}}{totalH - H_{previstas\ semanal}} \quad (\text{Ec. 4.14})$$

Donde:

Horas- Hombre previstas completadas: son las horas- hombre ejecutadas programadas para mantenimiento.

Total Horas –Hombre semanal previstas: son las horas- hombre totales previstas para mantenimiento en la semana.

El % cumplimiento de previsto cuyo valor de referencia es **% CP > 80%**; permite evaluar si las reparaciones planificadas están siendo ejecutadas a la frecuencia establecida. En caso tal, de que %CP **disminuya** se puede deducir que, se producen gran número de interrupciones, las prácticas de mantenimiento resultan ineficaces y el trabajo es insuficiente. Si, en caso contrario, % CP **aumenta**, se puede

concluir que las prácticas de mantenimiento son eficaces y los trabajos son completados.

- **Desviación de la planificación (DP)**

Indica la relación entre las Horas Hombre pendientes por ejecutar mantenimiento preventivo con relación a las Horas Hombre planificadas. Se expresa mediante la ecuación 4.15:

$$\%DP = \frac{HH \text{ Planificadas} - HH \text{ Ejecutadas}}{HH \text{ Planificadas}} \times 100 \quad \text{Ec. (4.15)}$$

Con este indicador se puede establecer si a las frecuencias establecidas las actividades de mantenimiento son ejecutadas o, por el contrario, se generan desviaciones de lo planificado.

- **Costo de mantenimiento por unidad de producción:**

Mide el costo de mantenimiento por unidad de producción en un período determinado. Este indicador se calcula con la ecuación 4.16 como se muestra:

$$CMUP = \frac{\text{Costo Total de Mantenimiento}}{\text{Total de Unidades Producidas en el Período Evaluado}} \quad \text{Ec. (4.16)}$$

Permite visualizar mejoras o deficiencias en el desempeño de las actividades de mantenimiento con relación a la producción.

- **Costo de mantenimiento preventivo (CMP):**

Relaciona el costo de mantenimiento preventivo con respecto al costo total de mantenimiento y se calcula usando la ecuación 4.17:

$$\%CMP = \frac{\text{Costo Total de Mantenimiento Preventivo}}{\text{Costo Total de Mantenimiento}} \times 100 \quad \text{Ec. (4.17)}$$

Permite determinar la atención prestada a la prevención de fallas de los equipos.

- **% de Degaste:**

Para equipos o componentes sometidos a desgaste o degradación en su rendimiento o en sus condiciones de operación, se define el siguiente indicador, como se muestra en la ecuación 4.18 y, que permite establecer la efectividad de las actividades de mantenimiento a una frecuencia dada en minimizar el desgaste del activo a lo largo de su tiempo de uso.

$$\%Degaste = 100\% - \frac{Df}{Di} * 100\% \quad \text{Ec. (4.18)}$$

Donde:

Di: es el desgaste del equipo o componente al iniciar el período de estudio

Df: el desgaste sufrido por activo completado el intervalo de estudio.

4.4.3 Índices de seguridad y medio ambiente:

Debido a la relevancia de los aspectos relacionados con la seguridad y al medio ambiente resulta importante incorporar algunos indicadores que permitan medir la efectividad de los planes de mantenimiento en evitar la ocurrencia de accidentes que

puedan afectar a las personas que laboran dentro de una instalación industrial o al medio ambiente. Así se tiene:

- **Índice de frecuencias de accidentes:** es la proporción entre el número de accidentes con bajas entre el total de horas trabajadas.
 - **Índice de frecuencia de incidentes ambientales:** es la proporción entre los incidentes ambientales graves y el número total de horas trabajadas.
- **Procedimiento para implantar un sistema de indicadores en una organización de mantenimiento.**

Para la correcta y adecuada implantación de los indicadores para evaluar la gestión del mantenimiento y determinar así, si se están logrando los objetivos y metas propuestas es recomendable cumplir con los siguientes pasos:

1. Formación de un equipo natural de trabajo para el proceso de implantación de los indicadores.
2. Definir el objetivo del indicador (identificar lo que se quiere medir y/o controlar).
3. Establecer el indicador (nombre). Utilizar razonablemente el número de indicadores.
4. Determinar o seleccionar la expresión matemática de cada indicador.
5. Establecimiento de metas.

6. Decidir periodicidad con la que se medirá el indicador (frecuencia) y asignar responsabilidades.
7. Diseñar formato y proceder al registro de información de las variables.
8. Cuantificar el indicador.
9. Comparación de los resultados con las metas.
10. Análisis de resultados, determinar causas de las desviaciones.
11. Toma de decisiones y puesta en marcha de las acciones preventivas como correctivas para mejorar el valor de cada indicador.

En la figura 4.21 se presenta el esquema para implantar los indicadores de mantenimiento.

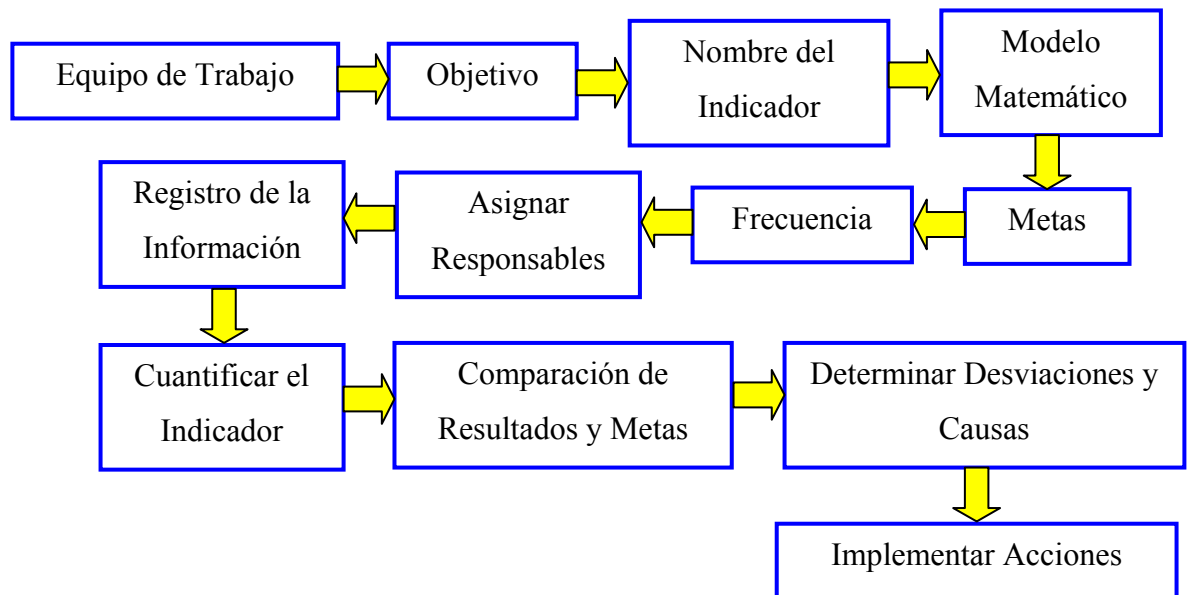


Figura 4.21.- Esquema para implantar los indicadores de mantenimiento.

Fuente: Suárez, D., 2008.

- **Formato recomendado para el registro de los indicadores.**

La tabla 4.27 se presenta un modelo del formato para el registro de la información referente a la implantación de los indicadores de gestión de mantenimiento.

Tabla 4.27.- Formato de registro de indicadores. [13]

Indicador	Objetivo	Ecuación	Frecuencia	Meta	Responsable

- **Instructivo para llenar el formato**

- Indicador: se coloca el nombre del indicador.
- Objetivo: indica que se quiere lograr a medir con el indicador.
- Ecuación: fórmula con la que se cuantifica el indicador.
- Frecuencia: periodicidad con la que se medirá el indicador.
- Meta: patrón de referencia contra el cual se comparará la medición.

Responsable: persona encargada del registro de la información.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

1. Para determinar la frecuencia de inspección o de ejecución de las tareas de mantenimiento preventivo existen diferentes metodologías, que son: usando los registros históricos, basados en la confiabilidad (distribución de Weibull), basándose en el mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC), empleando las cadenas de Markov (modelo del mantenimiento basado en condición (MBC)), en base a los modelos matemáticos diseñados por Barlow y Hunter (políticas I y II) y empleando los métodos basados en el análisis costo- riesgo- beneficio (ACRB).

2. La metodología de estimación basada en el MCC (tarea en condición) y usando las cadenas de Markov (modelo del MBC) permiten intervenir el activo cuando su condición de deterioro así lo requiere, logrando aprovechar al máximo su vida útil. Los métodos de estimación basados en la confiabilidad, en el uso de los registros históricos y en los modelos matemáticos de las políticas I y II establecen la frecuencia basados en el comportamiento real del equipo y permiten incrementar la confiabilidad del mismo. Las herramientas de estimación basadas en el ACRB permiten alcanzar una planificación costo-efectiva de las actividades de mantenimiento.

3. La política de mantenimiento basado en el fallo o dejar funcionar hasta que falle se aplica a los equipos no críticos, que al fallar no impactan significativamente el proceso productivo y lo que se busca es aprovechar al máximo su vida útil.

4. La metodología de estimación basada en el mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC) se utiliza para establecer los períodos de las actividades de mantenimiento para los equipos semí-críticos, puesto que, esta herramienta permite establecer la frecuencia tanto para tareas basadas en el monitoreo de la condición del activo como para las tareas basadas en el tiempo o uso del mismo.

5. Para los equipos críticos se definen distintos métodos para determinar la frecuencia de las tareas de mantenimiento preventivo. Si la tarea se basa en la condición se pueden emplear la metodología basada en el MCC (tarea en condición) o el método usando las cadenas de Markov (modelo del MBC). En el caso de tareas en base al tiempo o uso del activo, se utilizan el método basado en la confiabilidad, la estimación basado en los históricos de fallas y los modelos matemáticos de la pol I y II. Igualmente, los intervalos de mantenimiento se pueden ser establecidos basándose en un balance entre costos/beneficios por medio del ACRB.

6. El modelo desarrollado ofrece una alternativa a los métodos convencionales que se emplean en la estimación de las frecuencias de mantenimiento, puesto que, este se apoya en metodologías que según estén las tareas de mantenimiento basadas en la condición o el tiempo o uso del activo permiten, mediante modelos matemáticos, incrementar la disponibilidad y confiabilidad, y alcanzar una intervención oportuna y costo-efectiva de los equipos.

7. Se formulan indicadores de efectividad (disponibilidad, confiabilidad, efectividad operacional), indicadores claves de rendimiento (% de cumplimiento previsto, desviación de la planificación, costo de mantenimiento por unidad de producción, costo de mantenimiento preventivo), indicadores del desgaste del activo (% de desgaste) e índices de seguridad y medio ambiente (índice de frecuencia de accidentes e incidentes ambientales) para efectuar una valoración cuantitativa de la

aplicación del modelo asociado con la estimación de las frecuencias del mantenimiento preventivo.

5.2. Recomendaciones

- 1.** Aplicar el modelo desarrollado de forma experimental en cualquier escenario industrial, con el fin, de establecer las frecuencias de las actividades de mantenimiento y, de esta forma, completar los planes para el mantenimiento de los activos que intervienen en el proceso productivo.
- 2.** Se debe llevar un registro ajustado al comportamiento de los equipos en el tiempo. En el caso de ocurrir una falla se deben registrar no sólo el evento sino también el mecanismo que lo genera.
- 3.** Al momento de seleccionar alguna metodología de estimación para una aplicación en particular es necesario asegurarse que dicha técnica es consistente con las políticas y estrategias de mantenimiento propias de cada organización industrial, es decir, si la organización lo que desea es establecer los períodos de mantenimiento para que los equipos mantengan una confiabilidad dada se debe emplear el método de estimación basado en la confiabilidad (distribución Weibull), por otro lado, si el objetivo es maximizar la disponibilidad y que el mantenimiento se haga en base a la condición del activo se tiene que emplear la metodología basada en el uso de las cadenas de Markov. Pero, si la meta de la empresa es intervenir los equipos en el momento donde se obtengan el mejor balance entre lo que se invierte y la ganancia asociada se debe utilizar el método basado en el ACRB y así, respectivamente, se debe seleccionar la metodología más adecuada.

4. Previo al establecimiento de la nueva frecuencia se recomienda definir los valores referenciales de los indicadores que van a servir para evaluar el comportamiento y rendimiento de los activos dentro del proceso productivo.

5. Para la estimación de la frecuencia de mantenimiento de los equipos estáticos, como por ejemplo, tuberías y tanques, se sugiere emplear la metodología de Inspección Basada en Riesgo (IBR), puesto que, en este trabajo sólo se estudian metodologías de estimación para equipos rotativos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Maestre, R., **Rutinas de mantenimiento basados en la criticidad de los recipientes a presión y tanques apertados del campo San Joaquín, Distrito Gas-Anaco**, UDO, 2005.
2. Villalba, M. y Salón, M., **Cálculo de indicadores y análisis de gestión de mantenimiento a las locomotoras de CVG Ferrominera Orinoco C.A a fin de introducir mejoras en el sistema**, UDO, 2005.
3. Ríos, A., **Propuesta de una metodología para estimación de frecuencia de lavado axial de turbocompresores MARS 100 de PDVSA- Gas Anaco**, UDO, 2007.
4. De Miguel, A., y Martínez, P., **Diseño de Bases de datos: Modelo Entidad/Interrelación**. Publicado en:
basesdatos.uc3m.es/fileadmin/Docencia/DBD/Curso0607/Teoria/MODELO_ER.pdf.2006
5. Duffua, S., Raouf, A. y Campbell, J., **Sistemas de Mantenimiento: Planeación y Control**, Editorial Limusa Wiley, México, 2007.
6. Suárez, D. y Bravo, D., **Guía Teórico-Práctico: Mantenimiento Mecánico**, UDO, 2008.
7. **Tipos de Mantenimiento Industrial: Definición de mantenimiento Correctivo**.
Artículo publicado en:
http://www.solomantenimiento.com/m_correctivo.htm.

8. Monchy, F., **Teoría y práctica del mantenimiento**. Publicado en: exp-grafica.uma.es/Asignaturas/doctorado/ingenieria/document/clase-mantenimiento.pdf, 1990.
9. Mendoza, R., **El análisis de criticidad: una metodología para mejorar la confiabilidad**. Publicado en: www.confiabilidad.net/art_05/RCM/rcm_8.pdf.
10. Huerta, R., “**Taller de análisis y modos de efectos de falla (Confiabilidad Operacional II)**”, Engineering, Reliability and Management.
11. NAVAIR, **MANUAL MANAGEMENT: GUIDELINES FOR THE NAVAL AVIATION RELIABILITY CENTRED- MAINTANCE PROCESS**, Publicado en: www.barringer1.com/mil_files/NAVAIR-00-25-403.pdf, 2005.
12. Amari, S., y McLaughlin, L., **Optimal Design of a Condition-Based Maintenance Model**. Publicado en: www.relex.com/resources/papers/Condition-Based-Maint.pdf, 2004.
13. **Curso de Indicadores de gestión del Mantenimiento**, Confima & Consultores. Puerto la Cruz, 2008.
14. Amari, S., **Using the Weibull distribution to analyze legacy equipment**. Publicado en: http://www.relex.com/resources/art/art_weibull3.asp, 2004.
15. Quijano, J., **Mejora en la Confiabilidad Operacional de las plantas de generación de energía eléctrica: Desarrollo de una Metodología de gestión de mantenimiento basado en el Riesgo (RBM)**. Publicado en: www.iit.upcomillas.es/docs/TM-04-007.pdf, 2004.

16. Agencia Internacional de Energía Atómica, **Application of Reliability Centred Maintenance to Optimize Operation of Maintenance in Nuclear Power Plants.**

Publicado en:

www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1590_web.pdf, 2007.

17. Espinoza, H., **MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD.**

Publicado en: www.scribd.com/doc/3016183/Mant-centrado-en-confiabilidad-Prof-Espinoza, 2003.

18. Yañez, M., Perdomo J y Gomez, H., **Ingeniería de Confiabilidad: Pilar Fundamental del Mantenimiento**, Reliability and Risk Management S.A, 2002.

19. Suárez, R., **Cálculo de la frecuencia de inspección de mantenimiento predictivo.** Publicado en:

www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/Frec_pred.pdf, 2007.

20. Mejía, A., Holguin, M., y Betancourt, M., **Uso de las cadenas de Markov en la selección de políticas de mantenimiento.** Publicado en:

http://www.relex.com/resources/art/art_markov1.asp, 2007.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y
ASCENSO**

TÍTULO	“Desarrollo de un modelo conceptual para la estimación de las frecuencias de mantenimiento preventivo basado en las metodologías de estimación más utilizadas en el escenario industrial”
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CVLAC / E MAIL
Hernández Suárez, Alvaro José	CVLAC: 14.690.738 E MAIL: alvarojhernandezs@gmail.com

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

MODELO CONCEPTUAL

ESTIMACIÓN DE FRECUENCIAS

MANTENIMIENTO PREVENTIVO

METODOLOGÍAS DE ESTIMACIÓN

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUB ÁREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Mecánica

RESUMEN (ABSTRACT):

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal el desarrollo de un modelo para determinar la frecuencia de mantenimiento preventivo. Esta frecuencia representa el tiempo a transcurrir entre dos inspecciones o de realización de un trabajo de mantenimiento de un equipo o componente. El diseño de este modelo busca proponer una nueva herramienta que, basándose, en el comportamiento real del equipo, el contexto operacional donde opera, la data con la que se cuente del mismo, y las políticas de mantenimiento propias de cada empresa, permita establecer los planes orientados al logro de una intervención oportuna y costo-eficiente de los activos físicos. El modelo en referencia sugiere en base al nivel de criticidad de los equipos dentro del proceso productivo, los métodos para determinar los períodos de intervención. Para los equipos no críticos, se aplica la política de dejar funcionar hasta fallar, en el caso, de los equipos semi- críticos, la frecuencia de inspección o mantenimiento se establece basados en el método del MCC y para los equipos críticos, se plantean diferentes metodologías según la tarea de mantenimiento este basada en la condición o en el tiempo o uso del equipo. Finalmente, se formulan indicadores de gestión de mantenimiento, con el objeto de hacer una valoración cuantitativa del rendimiento de los activos y la efectividad del mantenimiento al ser implementadas las nuevas frecuencias. El modelo desarrollado ofrece una alternativa a los métodos convencionales que se emplean para la estimación de las frecuencias de mantenimiento y ofrece un método eficaz para alcanzar una intervención oportuna de los activos de una organización.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E-MAIL				
	ROL	CA	AS (X)	TU	JU
Bravo, Darwin	CVLAC:	V-8.298.181			
	e-mail:	darwinjbg@cantv.net			
	ROL	CA	AS	TU	JU(X)
Griffith, Luis	CVLAC:	V-5.194.070			
	e-mail:				
	ROL	CA	AS	TU	JU(X)
Espinoza, Henry	CVLAC:	V- 4.363.950			
	e-mail:				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	e-mail:				
	ROL	CA	AS	TU	JU

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2009	08	07
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
Tesis.estimacionfrecuenciamantenimientopreventivo.doc	Aplicación/msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K L M N O P Q
R S T U V W X Y Z . a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z . 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 .

ALCANCE

ESPACIAL: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Mecánico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ingeniería Mecánica

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al artículo 44 del Reglamento de Trabajo de Grado:

“Los Trabajos de Grado son exclusiva propiedad de la Universidad y solo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”

Hernández Suárez, Alvaro José

AUTOR

Prof. Darwin Bravo

TUTOR

Prof. Luis Griffith

JURADO

Prof. Henry Espinoza

JURADO

Prof. Delia Villarroel

POR LA SUBCOMISION DE TESIS