

ELABORACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA EL  
SISTEMA DE BOMBEO DEL GRUPO GEMI BASADO EN EL ANÁLISIS *FMECA* Y EN  
MEDICIONES CMD

ESTEBAN GUTIÉRREZ LAGOUEYTE

UNIVERSIDAD EAFIT  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ÁREA DE MANTENIMIENTO INDUSTRIAL  
MEDELLÍN  
2006

ELABORACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA EL  
SISTEMA DE BOMBEO DEL GRUPO GEMI BASADO EN EL ANÁLISIS *FMECA* Y EN  
MEDICIONES CMD

ESTEBAN GUTIÉRREZ LAGOUEYTE

Proyecto de grado para optar al título de  
Ingeniero Mecánico

Asesor Principal:  
JHON HARVY HENAO  
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD EAFIT  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ÁREA DE MANTENIMIENTO INDUSTRIAL  
MEDELLÍN  
2006

A mis padres y hermanos por sus consejos,  
su constante apoyo y compañía.

## AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos por la colaboración y asesoría en el presente proyecto a:

Ingeniero Jhon Harvy Henao Martinez

Y por la invaluable y oportuna ayuda en el tema de CMD a:

Ingeniero Juan Santiago Vallejo Jaramillo

A mis muy buenos amigos quienes con su alegría, ayuda, compañerismo, consejos y paciencia contribuyeron en gran medida en la realización de este proyecto:

Sandra Milena Medina

David Agudelo

David Orozco

Manuel Serna

Camilo Pérez

Fernando Sierra

Oscar Díaz

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.	
0	PRÓLOGO	14
0.1	INTRODUCCIÓN	14
0.2	ANTECEDENTES	15
0.3	JUSTIFICACIÓN	15
0.4	OBJETIVO GENERAL	16
0.5	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	18
1.1	OBJETIVO	18
1.2	INTRODUCCIÓN	18
1.3	MANTENIMIENTO PREVENTIVO	18
1.4	ANÁLISIS DE MODOS DE FALLOS Y EFECTOS CRÍTICOS ( <i>FMECA</i> )	19
1.5	NÚMERO DE RIESGO PRIORITARIO ( <i>RPN</i> )	22
1.6	CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y DISPONIBILIDAD (CMD)	23
1.6.1	Confiabilidad	24
1.6.2	Mantenibilidad	27
1.6.3	Disponibilidad	28
1.7	CONCLUSIÓN	29
2	ANÁLISIS DE FALLAS <i>FMECA</i>	30
2.1	OBJETIVO	30
2.2	INTRODUCCIÓN	30
2.3	PRINCIPIOS BÁSICOS	30
2.4	PROCEDIMIENTO <i>FMECA</i> y <i>RPN</i>	31
2.4.1	Selección del volumen de control	31
2.4.2	Fronteras y componentes del sistema	32
2.4.3	Funciones primaria y secundarias de los componentes	35

	pág.	
2.4.4	Fallas funcionales reales y potenciales del sistema de bombeo para las funciones descritas	36
2.4.5	Modos de falla	38
2.4.6	Consecuencias y efectos de los modos de falla	45
2.4.7	Medición del <i>RPN</i>	46
2.5	ACCIONES DE MANTENIMIENTO	52
2.6	CONCLUSIÓN	54
3	MEDICIÓN DE CMD	56
3.1	OBJETIVO	56
3.2	INTRODUCCIÓN	56
3.3	INDICADORES DE CONFIABILIDAD	56
3.3.1	Tiempo medio para fallar	57
3.3.2	Tiempo medio entre fallas	57
3.3.3	Tiempo medio entre mantenimientos	57
3.4	INDICADORES DE MANTENIBILIDAD	59
3.4.1	Tiempo medio para reparar	60
3.4.2	Tiempo medio de mantenimiento preventivo	60
3.4.3	Tiempo medio de mantenimiento activo	61
3.4.4	Tiempo de parada de mantenimiento	61
3.5	INDICADORES DE DISPONIBILIDAD	62
3.5.1	Disponibilidad inherente	62
3.5.2	Disponibilidad alcanzada	63
3.5.3	Disponibilidad operacional	64
3.6	DISTRIBUCION DE WEIBULL	64
3.7	MEDICIÓN CMD	67
3.7.1	Toma de datos	68
3.7.2	Análisis de los datos	69
3.7.3	Distribución de Weibull con el programa Valramor	70

	pág.	
3.7.4	Análisis de las gráficas obtenidas de la distribución de Weibull de cada bomba	72
3.7.5	Resultado de disponibilidades	76
3.8	CONCLUSIÓN	78
4	JERARQUIZACIÓN DE TAREAS	79
4.1	OBJETIVO	79
4.2	INTRODUCCIÓN	79
4.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS <i>RPN</i>	79
4.3.1	Tareas para reducir o eliminar los modos de falla	80
4.4	RECÁLCULO DEL <i>RPN</i>	85
4.4.1	Justificación de los modos de falla eliminados	85
4.4.2	Recálculo del <i>RPN</i> con las tareas proactivas realizadas.	86
4.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS <i>CMD</i>	89
4.5.1	Curva de la bañera tipos de fallas y estrategias	89
4.5.2	Estrategia de mantenimiento en función del parámetro Beta	93
4.5.3	Estrategias de mantenimiento en función de la vida media obtenida	94
4.6	PLAN DE MANTENIMIENTO PARA EL SISTEMA DE BOMBEO	95
4.7	CONCLUSIÓN	96
5	CONCLUSIONES	97
6	RECOMENDACIONES	101
	ANEXOS	102
	BIBLIOGRAFÍA	104
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS TOMADAS DE LIBROS	104
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS TOMADAS DE INTERNET	107

## LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1 Proceso de análisis de fallas.	20
Ilustración 2. Aplicabilidad de <i>FMECA</i> y <i>RCM</i> según falla y causa.	22
Ilustración 3. Relación de los indicadores CMD.	24
Ilustración 4. Volumen de control del sistema de bombeo.	32
Ilustración 5. Fronteras del sistema.	32
Ilustración 6. Diagrama del subsistema.	35
Ilustración 7. Bomba centrífuga	40
Ilustración 8. Representación gráfica para el cálculo del <i>MTBMc</i> .	58
Ilustración 9. Representación gráfica para el cálculo del <i>MTBMp</i> .	59
Ilustración 10. Representación gráfica del cálculo de la disponibilidad alcanzada.	63
Ilustración 11. Curva de Davies.	65
Ilustración 12. Ventana principal del programa Valramor.	71
Ilustración 13. Gráficas con los resultados del análisis.	71
Ilustración 14. Idealización de la curva de bañera con sus principales regiones.	90
Ilustración 15. Causas de fallas y estrategias mantenimiento en curva de Davies.	93

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Componentes del sistema principal.	33
Tabla 2. Características técnicas de los componentes del sistema principal.	34
Tabla 3. Funciones del sistema de bombeo.	36
Tabla 4. Fallas funcionales del sistema de bombeo.	38
Tabla 5. Clasificación de los modos de falla.	39
Tabla 6. Modos de falla bomba centrífuga.	40
Tabla 7. Modos de falla del motor eléctrico.	41
Tabla 8. Fallas funcionales y sus respectivos modos de falla del sistema de bombeo.	42
Tabla 9. Clasificación de las consecuencias.	46
Tabla 10. Valores de los criterios de severidad, ocurrencia y detección.	49
Tabla 11. Cálculo del <i>RPN</i> y jerarquización de ejecución de las tareas.	50
Tabla 12. Modos de falla con <i>RPN</i> más altos.	52
Tabla 13. Acciones de mantenimiento del sistema de bombeo.	53
Tabla 14. Datos tomados de un subsistema (Motobomba #1) en una parte del intervalo de tiempo.	69
Tabla 15. Gráficas del tiempo entre mantenimiento correctivo ( <i>TBMc</i> ). Distribución Weibull.	73
Tabla 16. Gráficas del tiempo para reparar ( <i>TTR</i> ). Distribución Weibull.	74
Tabla 17. Gráficas del tiempo entre mantenimiento preventivo ( <i>TBMp</i> ). Distribución Weibull.	75
Tabla 18. Gráficas de la duración del mantenimiento preventivo ( <i>Mpt</i> ). Distribución Weibull.	76
Tabla 19. Resumen de los resultados de la medición del CMD.	77
Tabla 20. Tareas de mantenimiento para el sistema de bombeo.	84
Tabla 21. Recálculo del <i>RPN</i> .	87
Tabla 22. Comparación de modos de falla antes y después de hacer las tareas de mantenimiento.	89

	pág.
Tabla 23. Estrategias de mantenimiento para el sistema de bombeo en función del parámetro Beta.	94
Tabla 24. Indicadores de confiabilidad	94
Tabla 25. Plan de mantenimiento para el sistema de bombeo.	96

## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Cálculo del <i>RPN</i>	47
Ecuación 2. Cálculo de la Severidad.	47
Ecuación 3. Definición del tiempo medio entre fallas.	57
Ecuación 4. Definición del tiempo medio entre mantenimientos.	57
Ecuación 5. Definición tiempo medio entre mantenimientos correctivos.	58
Ecuación 6. Cálculo del tiempo medio para reparar	60
Ecuación 7. Definición del tiempo medio de mantenimiento preventivo.	61
Ecuación 8. Definición del tiempo medio de mantenimiento activo.	61
Ecuación 9. Definición del tiempo de parada de mantenimiento.	62
Ecuación 10. Definición matemática de la disponibilidad inherente.	62
Ecuación 11. Definición matemática de la disponibilidad alcanzada.	63
Ecuación 12. Definición matemática de la disponibilidad operacional.	64
Ecuación 13. Función de densidad de la distribución de Weibull.	66
Ecuación 14. Función de confiabilidad de la distribución de Weibull.	66
Ecuación 15. Función de tasa de fallas de la distribución de Weibull.	66
Ecuación 16. Esperanza matemática de la distribución de Weibull.	67
Ecuación 17. Varianza de la distribución de Weibull.	67

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Resultados de las disponibilidades inherente, alcanzada y operacional.	77
Gráfica 2. Resultados de confiabilidad del sistema de bombeo.	95

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Cotización suiche de nivel tipo flotador.	102
Anexo B. Cotización sensor de nivel.	103

## 0 PRÓLOGO

### 0.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo final busca implementar un plan de mantenimiento preventivo basado en un análisis *FMECA*<sup>1</sup> para un sistema de bombeo compuesto por 6 bombas en paralelo e independiente cada una de ellas.

La solución se desarrolla mediante la inspección e identificación de las áreas o ensambles en las cuales es más probable que se generen las fallas del sistema, mediante herramientas de mantenimiento preventivo y mediciones de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD).

La aplicación final del trabajo realiza un plan de mantenimiento preventivo para el sistema de bombeo mediante la programación de inspecciones periódicas programadas racionalmente sobre el sistema mencionado, con el fin de detectar condiciones o estados inadecuados de esos elementos que puedan ocasionar circunstancialmente paros en el sistema o deterioro grave de las bombas, y realizar en forma permanente el cuidado de mantenimiento adecuado del sistema de bombeo para evitar tales condiciones (Mora, 2005,247).

El trabajo analiza la solución a este desarrollo a partir de las teorías de mantenimiento preventivo y CMD, que hacen de ésta una aplicación confiable para la persona que desee profundizar en el estudio del proyecto o como posible adaptación en sistemas de bombeos.

---

<sup>1</sup> *FMECA failure mode, effects causes and criticality analysis* – análisis de modos de fallos y efectos críticos.

## 0.2 ANTECEDENTES

El grupo de estudios en mantenimiento industrial GEMI es un grupo de investigación de la universidad EAFIT perteneciente al departamento de ingeniería mecánica. GEMI atiende las investigaciones que se generan alrededor de la especialización en mantenimiento industrial a través de sus monografías y proyectos de investigación de postgrado, entre otros.

El grupo desarrolla investigaciones empíricas, experimentales, exploratorias, concluyentes, descriptivas, estadísticas, correlacionales sobre fenómenos directos o asociados a la gestión y operación de mantenimiento industrial, empresarial o comercial sobre equipos con base en la generación de servicios, desde la óptica de sus elementos principales: mantenimiento, máquinas o producción en sus cuatro niveles, instrumental, operacional, táctico y estratégico, con aplicaciones industriales.

El grupo GEMI se desenvuelve dentro del área técnica en donde tiene un proyecto aprobado por la universidad llamado “Diseño para la medición de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD) de equipos en mantenimiento industrial”. Dicha área le permite investigar aspectos cuantificables sobre el ciclo integral de vida de los equipos, basado en el seguimiento real de las caracterizaciones técnicas de los mismos bajo parámetros internacionales.

## 0.3 JUSTIFICACIÓN

El proyecto realiza un plan de mantenimiento preventivo para el sistema de bombeo a partir de la metodología completa de análisis de fallas *FMECA* y de la medición CMD buscando como objetivo final establecer las diferentes acciones y estrategias de mantenimiento.

El desarrollo del plan de mantenimiento preventivo y los análisis de posibles fallas se realizan bajo las bases ya existentes de un proyecto de la Universidad EAFIT el cual consiste en dar una idea técnica y numérica del comportamiento en el tiempo de las fallas, la confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad en seis bombas y motores de iguales características (Mora y otros, 2005,56).

El plan de mantenimiento preventivo es esencial para el desarrollo de este proyecto, ya que permite tener un conocimiento completo sobre todos los equipos, accesorios y partes que componen el sistema de bombeo, además de las frecuencias de cambios y mantenimientos recomendadas para cada uno de ellos. De éste también depende el buen desempeño del sistema de bombeo y el fácil seguimiento en operación y mantenimiento de los sistemas (Higgins,1988,55).

#### 0.4 OBJETIVO GENERAL

Generar un plan de mantenimiento preventivo para el sistema de bombeo GEMI con base en el análisis de modos de fallas y efectos críticos (*FMECA*), e implementando las mediciones de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD) para la jerarquización de las tareas de mantenimiento.

#### 0.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Fundamentar los conceptos de mantenimiento preventivo, *FMECA*, *RPN*<sup>2</sup> y CMD.
2. Desarrollar la metodología completa de análisis de fallas *FMECA* para el sistema de bombeo con el fin de determinar las tareas de mantenimiento mediante el uso del *RPN*.

---

<sup>2</sup> *RPN risk priority number* – número prioritario de riesgo.

3. Medir el CMD a partir del  $MTBMp^3$ ,  $MTBMc^4$ ,  $MTTR^5$ ,  $\overline{M}_{pt}^6$  para disponibilidad alcanzada durante cuatro meses como mínimo.
4. Replantear la jerarquización de las tareas proactivas y correctivas después de realizar las mediciones CMD.
5. Concluir los principales objetivos del proyecto.

---

<sup>3</sup> *MTBMp mean time between maintenance preventive*- tiempo medio entre mantenimiento preventivo.

<sup>4</sup> *MTBMc mean time between maintenance corrective*- tiempo medio entre mantenimiento correctivo.

<sup>5</sup> *MTTR mean time to repair*- tiempo medio para reparar.

<sup>6</sup> *Mpt mean preventive maintenanca time*- tiempo medio de mantenimiento preventivo.

## 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 1.1 OBJETIVO

Fundamentar los conceptos de mantenimiento preventivo, *FMECA*, *RPN* y *CMD*.

### 1.2 INTRODUCCIÓN

El desarrollo del siguiente capítulo está basado fundamentalmente en la apreciación del mantenimiento preventivo, así como de las principales nociones del *FMECA*, la definición de *RPN* y los principales términos del *CMD*.

### 1.3 MANTENIMIENTO PREVENTIVO

El mantenimiento preventivo son aquellas actividades tendientes a la preservación y/o adecuada operación de los bienes físicos de una empresa, desarrolladas sistemáticamente antes del tiempo en que se habría presentado la falla.

Las tareas de mantenimiento preventivo buscan reducir la probabilidad de que un equipo o sistema falle o bien sea para maximizar el beneficio operativo. Una rutina muy normal en un mantenimiento preventivo consta de: desmontaje, reparación o cambio de la pieza, montaje y por último pruebas y verificación del equipo o sistema (Knezevic,1996,20).

Las acciones del mantenimiento preventivo comprenden todo lo relacionado con revisiones, modificaciones y mejoras dirigidas a evitar averías de una manera sistemática por medio de revisiones periódicas que se pueden definir como inspeccionar, controlar y reparar antes de que se produzca la avería. Los planes de mantenimiento son el resultado de plasmar ordenadamente dichas acciones en

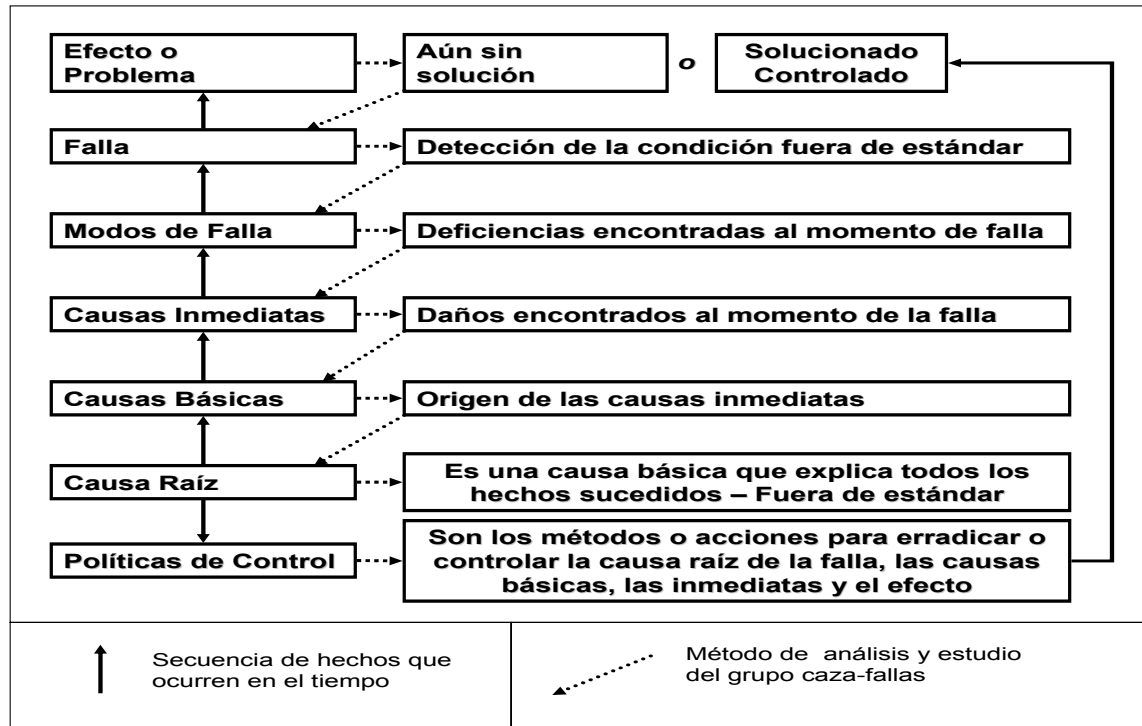
períodos anuales, mensuales, semanales, entre otros, de acuerdo con la exigencia de cada equipo (Peiró,1982,82), (Morrow,1985,135).

#### 1.4 ANÁLISIS DE MODOS DE FALLOS Y EFECTOS CRÍTICOS (*FMECA*)

El análisis de modos de fallos y efectos críticos (*FMECA*) es una técnica empleada para cuantificar y clasificar las fallas críticas en el diseño del producto o en el proceso. El propósito de la técnica *FMECA* es poder conocer completamente el equipo mediante la identificación de los sistemas y de los componentes que lo conforman, el diseño, los procesos, los elementos y los materiales de fabricación, los ensambles y los sub-ensambles parciales, así como todos los demás aspectos pertinentes que permitan aplicar el análisis integral de fallas (Duffuaa,1996,270) (Harris,1994,195).

El *FMECA* puede llegar a detectar en forma preventiva o anticipada cualquier anomalía que ocurra a futuro en la funcionalidad del equipo, para ello se siguen una serie de pasos, que se describen más adelante (Mora, 2005, 179).

Ilustración 1 Proceso de análisis de fallas.



Mora, 2005, 180.

El principal interés del *FMECA* es el de resaltar los puntos críticos con el fin de eliminarlos o establecer un sistema preventivo (medidas correctoras) para evitar su aparición o minimizar sus consecuencias, con lo que se puede convertir en un riguroso procedimiento de detección de defectos potenciales, si se aplica de manera sistemática (Método AMFE@,2006).

El *FMECA* es una de las técnicas más importantes para prevenir situaciones anormales, ya sea en el diseño, operación o servicio. Esta técnica parte del supuesto que se va a realizar un trabajo preventivo para evitar la avería. Esta técnica nació con el dominio de la ingeniería de fiabilidad y se ha aplicado especialmente para la evaluación de diseños de productos nuevos. (Método AMFE@,2006).

El análisis de la evaluación por medio de *FMECA* puede tomar dos cursos de acción, usando datos históricos o mediante la estadística inferencial, modelación matemática, simulación y confiabilidad. Estas técnicas se usan para identificar y definir las fallas. Al usar *FMECA* no quiere decir que un método es más preciso que el otro; los dos métodos pueden ser eficientes y precisos si se realizan correctamente (Stamatis,1995,25).

El *FMECA* se ha introducido en las actividades de mantenimiento industrial gracias al desarrollo del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad o *RCM*<sup>7</sup> que lo utiliza como una de sus herramientas básicas. En un principio se aplicó en el mantenimiento en el sector de la aviación, y debido a su éxito se difundió en el mantenimiento de plantas térmicas y centrales eléctricas. Hoy en día, el *FMECA* se utiliza en numerosos sectores industriales y se ha asumido como una herramienta clave en varios de los pilares del mantenimiento productivo total (*TPM*<sup>8</sup>) (Método AMFE @,2006).

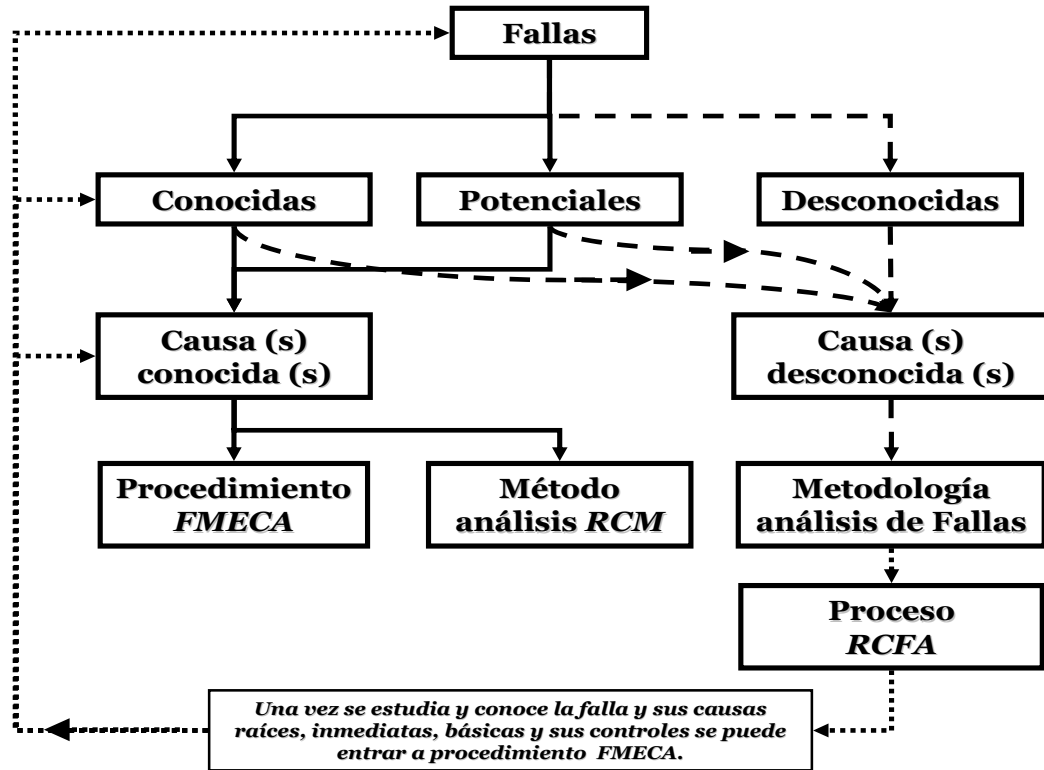
El análisis de fallas presenta dos opciones: cuando se desconoce la causa de la falla y cuando se sabe de todas (o la mayoría) las fallas reales y/o potenciales con sus correspondientes causas. En el primero de los casos se utiliza la metodología de análisis de fallas y en la segunda se aplica el procedimiento *FMECA*. El procedimiento *FMECA* usa tres parámetros: severidad, ocurrencia y probabilidad de detección (Stamatis,1995,120).

---

<sup>7</sup> *RCM reliability center maintenance.*

<sup>8</sup> *TPM total productive maintenance.*

Ilustración 2. Aplicabilidad de *FMECA* y *RCM* según falla y causa.



Mora,2005,178.

### 1.5 NÚMERO DE RIESGO PRIORITARIO (*RPN*)

El número de riesgo prioritario es el producto matemático de la seriedad de los efectos (severidad), de la probabilidad que una causa genere el incidente asociado a esos efectos (ocurrencia), y una capacidad para detectar el incidente antes de que llegue al cliente (detección). Este valor se emplea para identificar los riesgos más serios para buscar acciones correctivas. (Henao,2005,108).

El valor *RPN* simplemente sirve para clasificar en un orden cada uno de los modos de falla que existen en un sistema. Una vez el *RPN* se ha determinado, se inicia la evaluación sobre la base de definición de riesgo. Usualmente este riesgo es

definido por el equipo que realiza el estudio teniendo como referencia criterios como: menor, moderado, alto y crítico (Método AMFE@, 2006).

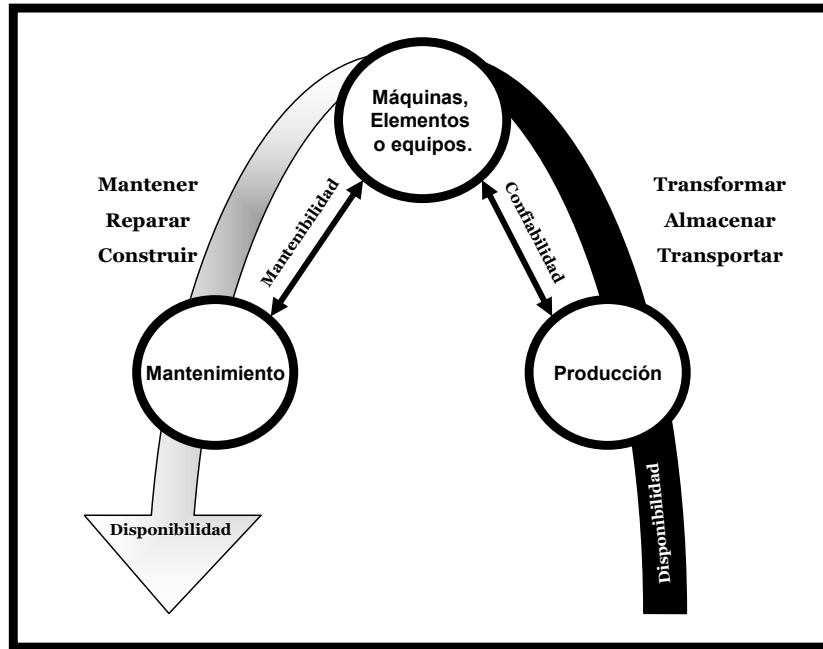
El resultado del *RPN* define la prioridad de la falla y por si mismo carece de valor o significado, éste sólo se usa para definir las potenciales deficiencias del sistema. El *RPN* debe ser revisado luego de emprender cualquier acción sobre el sistema y que afecte la severidad, la ocurrencia o la detección; no importa cuantas veces sea necesario hacerlo hasta que éste cubra toda la información relevante y pertinente a la acción tomada (Henao,2005,109).

#### 1.6 CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y DISPONIBILIDAD (CMD)

La confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad son prácticamente las únicas medidas técnicas y científicas fundamentadas en cálculos matemáticos, estadísticos y probabilísticas que tiene el mantenimiento para su análisis y posterior evaluación.

La relación entre el mantenedor y la máquina se denomina mantenibilidad, la relación entre el productor y la máquina se conoce como confiabilidad y la relación entre los tres elementos, productor, máquina y mantenedor se define como disponibilidad (Mora,2005,46).

Ilustración 3. Relación de los indicadores CDM.



Mora y otros, 2005,47.

### 1.6.1 Confiabilidad

La medida de la confiabilidad de un equipo es la frecuencia a la cual ocurren las fallas en el tiempo. Si no hay fallas, el equipo es ciento por ciento confiable; si la frecuencia de fallas es muy baja, la confiabilidad del equipo es aún aceptable; pero si la frecuencia de fallas es muy alta, el equipo es desconfiable. Un equipo bien diseñado, montado y probado y apropiadamente mantenido no debe fallar nunca; sin embargo, la experiencia ha demostrado que incluso los equipos mejor diseñados, montados y mantenidos no eliminan completamente las fallas (Bazovsky,1961,3).

Los autores definen en general la confiabilidad de un ítem o sistema como la probabilidad de que éste desempeñe adecuadamente su función durante un intervalo de tiempo y bajo condiciones ambientales o de entorno específicas

(Leemis,1995,2) (Bazovsky,1961,11) (Nachlas,1995,18). Se destacan en tal definición cuatro componentes importantes: la probabilidad, el desempeño adecuado, el tiempo y el entorno.

La probabilidad de ocurrencia de un evento de acuerdo con el método clásico, es considerada como el resultado de dividir los casos favorables, que pueden ocurrir en un suceso, por el total de casos posibles (Moreno y otro,1999,61), la probabilidad obtenida tiende a ser más exacta cuanto mayor sea el número de intentos, logrando ser determinada cuando éstos tienden a ser infinitos (Ramakumar,1993,13). De esta manera se puede suponer que la estimación es cercana a un valor real cuando el número de intentos es lo suficientemente grande<sup>9</sup>.

Ecuación 1. Probabilidad de ocurrencia de un evento y confiabilidad.

$$\begin{array}{l} P_f = \left( \frac{n}{N} \right) \\ P_f = \lim_{N \rightarrow \infty} \left( \frac{n}{N} \right) \\ R_s = 1 - P_f \end{array}$$

Ramakumar,1993,13

Donde:  $P_f$ : probabilidad de ocurrencia del evento n o de fallo.

n: evento n.

N: número total de eventos.

$R_s$ : probabilidad de éxito o confiabilidad.

---

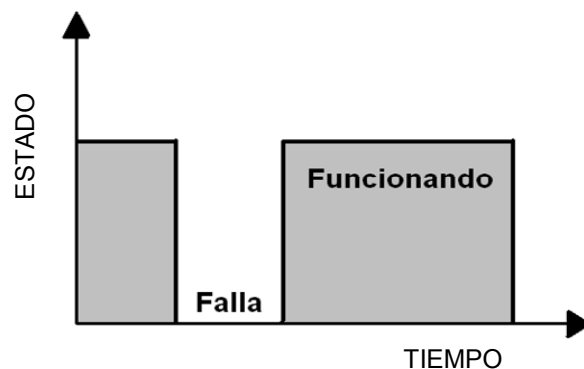
<sup>9</sup> Algunos autores recomiendan tomar mínimo 30 datos.

El segundo componente de la definición de confiabilidad es el desempeño de la función, éste no implica una falla completa, sino la condición de un desempeño no satisfactorio, por ejemplo, un motor puede estar trabajando pero estar recalentado. Por lo tanto se requiere una definición clara de lo que es una falla, es decir, debe haber claridad acerca de las condiciones de desempeño (Ramakumar,1993,3).

El fallo del sistema puede ser definido como un suceso cuya realización provoca, o bien la pérdida de capacidad para realizar las funciones requeridas, o bien la pérdida de capacidad para satisfacer los requisitos de desempeño especificados (Knezevic,1996,18).

El punto de partida para el estudio de la confiabilidad es el funcionamiento correcto, el complemento del funcionamiento correcto es el fallo. Por tanto, su estudio trata la dicotomía de que un dispositivo o bien funciona adecuadamente o está en falla, es decir, reconoce que sólo se asumen dos estados posibles y mutuamente excluyentes que son fallo y no fallo (Nachlas,1995,19).

Figura 1. Diagrama de estados de un equipo.



Gnedenko y otro,1995,218

El tiempo, el tercer componente, es la variable aleatoria de la definición de confiabilidad y se refiere a la duración del funcionamiento o duración de vida. La

medición de la confiabilidad incluye el tiempo, lo que implica el uso de las distribuciones de probabilidad las cuales deben ser modelos razonables de la dispersión de los tiempos de vida (Nachlas,1995,58).

El cuarto elemento de la definición de confiabilidad, que es la condición de operación, debe incluir la naturaleza y cantidad de la carga y las condiciones ambientales tales como humedad, temperatura, visibilidad, etc., durante la operación (Ramakumar,1993,4).

#### 1.6.2 Mantenibilidad

La mantenibilidad está relacionada con la duración de las paradas por mantenimiento y el tiempo que toma efectuar las acciones de restauración. Las características de la mantenibilidad se determinan usualmente por el diseño del equipo, el cual establece los procedimientos de mantenimiento y la duración de los tiempos de reparación (Barringer,1996,4).

El consenso general de los autores define la mantenibilidad como la probabilidad de poder reparar un equipo y llevarlo a su condición de funcionamiento dentro de un tiempo específico después de una falla y realizado al nivel de confianza deseado, con un personal con las habilidades necesarias y el equipo indicado. La mantenibilidad es la característica inherente de un elemento, asociada a su capacidad de ser recuperado para el servicio cuando se realiza la tarea de mantenimiento bajo las condiciones especificadas (Knezevic,1996,47).

El resultado de la mantenibilidad es el logro de tiempos cortos de reparación para mantener una alta disponibilidad, de tal manera que se minimicen las paradas de los equipos productivos para el control de costos, cuando la disponibilidad es crítica (Barringer,1996,4).

### 1.6.3 Disponibilidad

La disponibilidad es la probabilidad de que el equipo esté operando satisfactoriamente en el momento en que sea requerido después del comienzo de su operación y se usa bajo condiciones estables. El tiempo total considerado puede incluir el tiempo de operación, tiempo activo de reparación, tiempo inactivo, tiempo en mantenimiento preventivo, tiempo administrativo y tiempo logístico, de acuerdo con el tipo de disponibilidad seleccionada (Blanchard y otro, 1995, 127).

La frecuencia con la cual un sistema se encuentra disponible se expresa básicamente como la relación de sus tiempos de funcionamiento y sus tiempos de parada y presenta diferentes variantes. El tiempo de funcionamiento y el tiempo de parada son mutuamente excluyentes por la condición dicotómica de los estados de un sistema; el tiempo de funcionamiento se refiere a la capacidad de desempeñar una tarea, en tanto que el tiempo de parada se refiere a la imposibilidad de desempeñarla (Barringer, 1997, 4).

Ecuación 2. Disponibilidad general.

$$\frac{UT}{UT + DT}$$

Barringer, 1997, 4

Donde: UT: tiempo de funcionamiento.

DT: tiempo de parada.

La disponibilidad puede ser incrementada de dos maneras básicas, una es construir las cosas extremadamente fiables y, por lo tanto, costosas; la segunda es suministrar un sistema que, cuando falle, sea fácil de recuperar. De esta forma, si se tiene un equipo muy fiable y es fácil de reparar, se obtiene un sistema muy eficaz (Knezevic, 1996, 23).

## 1.7 CONCLUSIÓN

El capítulo visto plantea los conceptos básicos necesarios para la comprensión de las teorías empleadas para el desarrollo de este proyecto tales como las definiciones de análisis de fallas, mantenimiento preventivo, confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad. La definición de estos conceptos ayuda a comprender mejor los capítulos que vienen a continuación.

## 2 ANÁLISIS DE FALLAS *FMECA*

### 2.1 OBJETIVO

Desarrollar la metodología completa de análisis de fallas *FMECA* para el sistema de bombeo con el fin de determinar las tareas de mantenimiento mediante el uso del *RPN*.

### 2.2 INTRODUCCIÓN

El capítulo mostrado a continuación desarrolla la metodología completa planteada para el análisis *FMECA* aplicada a un sistema de bombeo y así mismo se realiza el cálculo del *RPN* para los modos de falla encontrados a lo largo del desarrollo del proyecto de grado y en el progreso de la investigación del grupo GEMI.

### 2.3 PRINCIPIOS BASICOS

El análisis de modos de falla y efectos críticos (*FMECA*) es una técnica empleada para cuantificar y clasificar las fallas críticas en el diseño del producto o en el proceso. El propósito de la técnica *FMECA* es poder conocer completamente el equipo mediante la identificación de los sistemas y de los componentes que lo conforman para aplicar el análisis integral de fallas (Duffuaa,1996,270) (Harris, 1994,198).

El *FMECA* es una de las técnicas más importantes para prevenir situaciones anormales, ya sea en el diseño, operación o servicio. Esta técnica parte del supuesto que se va a realizar un trabajo preventivo para evitar la avería.

El principal interés del *FMECA* es el de resaltar los puntos críticos con el fin de eliminarlos o establecer un sistema preventivo (medidas correctoras) para evitar

su aparición o minimizar sus consecuencias, con lo que se puede convertir en un riguroso procedimiento de detección de defectos potenciales, si se aplica de manera sistemática (AMEF@,2006).

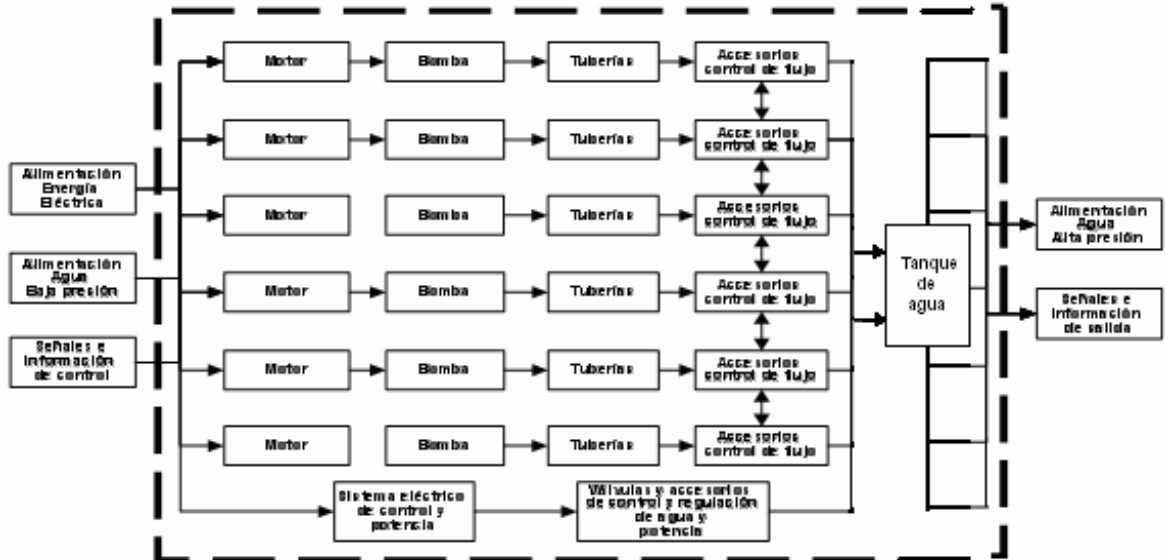
## 2.4 PROCEDIMIENTO *FMECA* Y *RPN*

El procedimiento *FMECA* tiene como función principal organizar todas las tareas correctivas, modificativas o proactivas a realizar de mantenimiento. El método procedimental *FMECA* parte del concepto de que ya se conocen todas las fallas reales y potenciales, se saben los modos de fallas en que se pueden presentar y se tiene un perfecto dominio de todas las funciones principales y auxiliares de los elementos o máquinas a evaluar con el procedimiento. Por su parte el *RPN* lo que hace es jerarquizar cada una de las tareas a realizar en los diferentes elementos o equipos, con el fin de priorizar los esfuerzos en los equipos que más lo requieran acorde a su grado de criticidad (Mora,2005,212).

### 2.4.1 Selección del volumen de control

Para definir el volumen de control del elemento o de la máquina que se va a evaluar se debe comenzar con equipos conocidos de mediana criticidad e importancia. En el volumen de control se definen los elementos que van a ser estudiados y sólo se tienen en cuenta los que están considerados dentro de los límites establecidos (\_\_\_\_,\_\_\_\_,213).

Ilustración 4. Volumen de control del sistema de bombeo.



Mora,2005.

#### 2.4.2 Fronteras y componentes del sistema

La frontera en el mantenimiento se puede definir como aquellas máquinas, aparatos y elementos en los cuales se realizan los análisis pertinentes y desarrollos de los diferentes niveles de mantenimiento.





En el sistema de bombeo se establecen las fronteras mediante los límites y las condiciones de entrada y salida como las unidades y los elementos de los componentes (Mora,2005,213).

Ilustración 5. Fronteras del sistema.



El sistema de bombeo se encuentra en la parte exterior del laboratorio de hidráulica de la universidad EAFIT. Las unidades que componen el sistema principal son: bomba, motor, tubería, accesorios de agua y tablero de control.

Tabla 1. Componentes del sistema principal.

	
<p>A. Bomba</p>	<p>B. Motor</p>
	
<p>C. Tubería y accesorios de agua</p>	<p>D. Tablero de control</p>

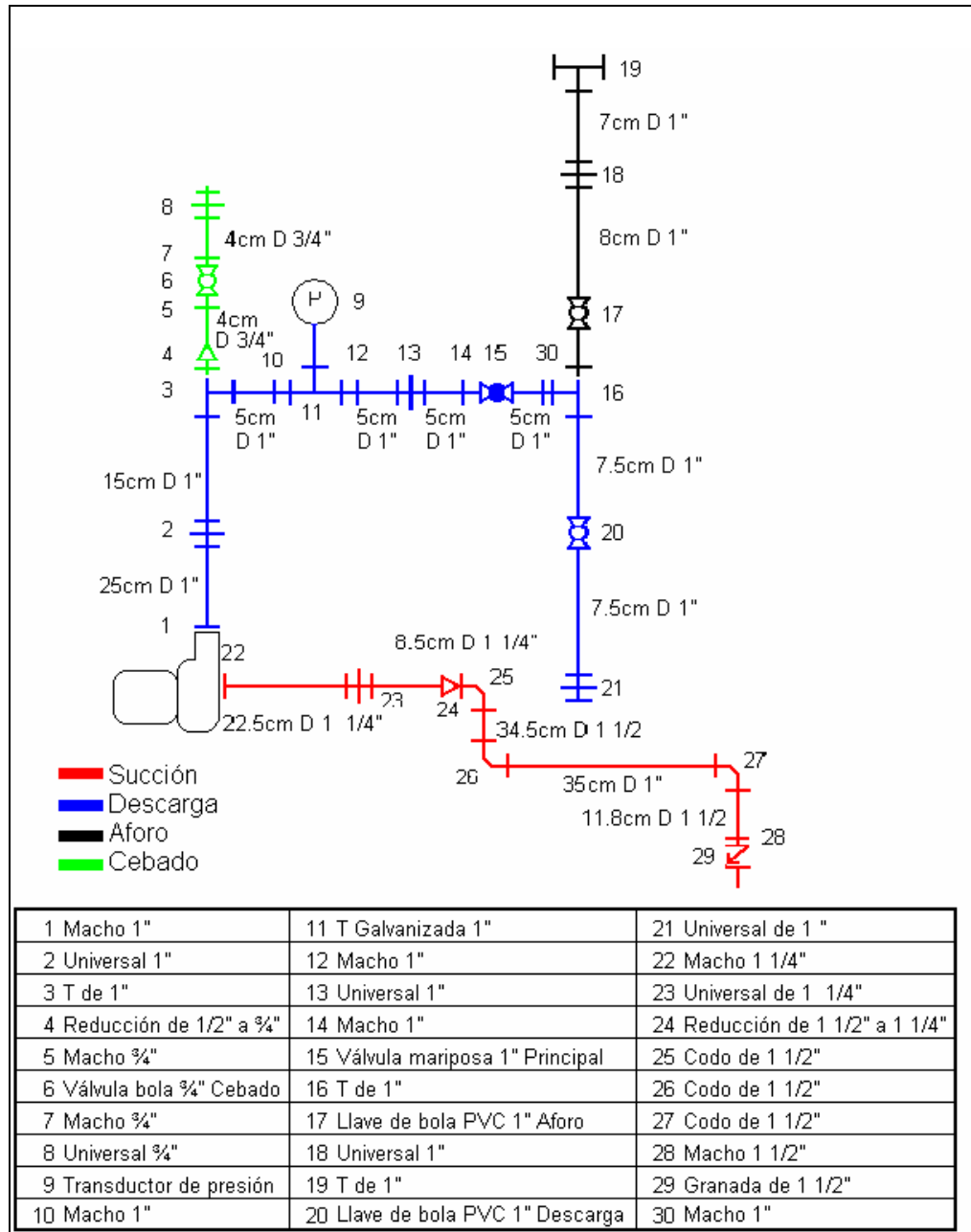
En cada componente principal se denotan las características técnicas, por medio de las cuales se pueden identificar las fallas, los modos de fallas y las funciones.

Tabla 2. Características técnicas de los componentes del sistema principal.

Componente	Descripción	
Bomba	Caudal – Q	Entre 17 y 20 galones por minuto
	Presión – H	Entre 50 y 74 psi
	Temperatura - T	Entre 30°C y 100°C
	Rotación - RPM	Entre 3000 y 3200
	Presión salida - Ps	Entre 190 y 220 psi
Motor	Tensión nominal	230 voltios
	Corriente	3.1 amperios
	Potencia	0.9 kilowatios
	Coseno phi	0.86
	Frecuencia	60 Hertz
	Rotación - RPM	3420

La disposición de los elementos de cada subsistema de bombeo está descrita por medio del diagrama que se muestra en la ilustración 6, cabe anotar que este diagrama es sólo de uno de los subsistemas de bombeo, sin embargo los otros cinco son similares. Para efectos del manejo de la metodología desarrollada en este proyecto de grado la herramienta *FMECA* y el desarrollo del plan de mantenimiento preventivo se realizan en un subsistema de bombeo.

Ilustración 6. Diagrama del subsistema.



### 2.4.3 Funciones primaria y secundarias de los componentes

La función primaria del equipo es la razón de ser del mismo, es la que explica porqué es adquirido el equipo y la misión que debe cumplir dentro del proceso

productivo, normalmente es la salida principal del sistema (producto del sistema). La mayoría de las veces la función primaria es el verbo del nombre del equipo, por ejemplo, en un compresor la función primaria es comprimir, en una licuadora licuar, en un transformador transformar energía, en una bomba es bombear, etc. La función primaria está vinculada a conceptos como velocidad, producción, calidad, servicio al cliente y características técnicas, entre otras. (Mora,2005,216).

Las funciones auxiliares, de apoyo logístico o secundarias, son actividades que le ayudan al sistema a cumplir su función primaria, son aquellas otras funciones que el activo está en capacidad de cumplir de forma adicional a la función primaria. Eventualmente el sistema o equipo puede funcionar sin ellas (aunque no es lo ideal) (\_\_\_\_,\_\_\_\_,\_\_\_\_).

Tabla 3. Funciones del sistema de bombeo.

Función	Código	Descripción
Primaria	0	0. Recircular agua en un sistema de bombeo cerrado sin dejar elevar la corriente por encima de 3.5 amperios y manteniendo un caudal mínimo de 17 galones por minuto.
Secundaria	1	1. Mantener la presión del sistema en un rango de 20 y 35 psi.
Secundaria	2	2. Encender y apagar todo el sistema en el momento de accionar un interruptor.
Secundaria	3	3. Permitir la conservación del fluido dentro del sistema.
Secundaria	4	4. Parar todo el funcionamiento al oprimir un interruptor de emergencia.
Secundaria	5	5. Mantener una potencia mínima de 0.5 KW.
Secundaria	6	6. Restringir total o parcialmente el flujo de agua dentro del sistema.
Secundaria	7	7. Interrumpir el sistema cuando la temperatura del motor alcance 80°C.
Secundaria	8	8. Mantener la temperatura de operación por debajo de 70°C.
Secundaria	9	9. Mantener un nivel bajo de vibraciones.
Secundaria	10	10. Mantener un nivel bajo de ruido.

Henao y otros,2005.

#### 2.4.4 Fallas funcionales reales y potenciales del sistema de bombeo para las funciones descritas

Las fallas funcionales reales y potenciales para cada una de las funciones descritas (primarias y secundarias), se denotan con letras mayúsculas. La aplicación del procedimiento *FMECA* implica conocer de manera profunda todas

las circunstancias y eventos que conllevan a la falla de la función principal o secundaria del sistema, tanto para casos reales como potenciales. Se deben conocer todas las causas inmediatas, básicas y raíces de las diferentes fallas funcionales (Mora,2005,217).

Las fallas funcionales son ocurrencias no previsibles, que no permiten al activo alcanzar el estándar de ejecución esperado y traen como ocurrencia que el activo no pueda cumplir su función o la cumpla de forma ineficiente (Mora,2005,218).

Las fallas funcionales primaria y secundaria son basadas en los límites de los equipos así como en los límites para los cuales es utilizado el sistema de bombeo.

Tabla 4. Fallas funcionales del sistema de bombeo.

Función	Código	Descripción de la función	Item falla funcional	Código de la falla funcional	Descripción de la falla funcional
Primaria	0	Recircular agua en un sistema de bombeo cerrado sin dejar elevar la corriente por encima de 3.5 amperios y manteniendo un caudal mínimo de 17 galones por minuto.	A	0-A	El agua no circula
			B	0-B	Se eleva la corriente por encima de 3.5 amperios
			C	0-C	El caudal entregado por el sistema es menor de 17 galones por minuto.
			D	0-D	El sistema se apaga
Secundaria	1	Mantener la presión del sistema en un rango de 20 y 35 psi.	A	1-A	La presión del sistema está por debajo de 20 psi
			B	1-B	La presión del sistema está por encima de 35 psi
Secundaria	2	Encender y apagar todo el sistema en el momento de accionar un interruptor.	A	2-A	El sistema no enciende al accionar el interruptor
			B	2-B	El sistema no apaga al accionar el interruptor
Secundaria	3	Permitir la conservación del fluido dentro del sistema.	A	3-A	El nivel de agua disminuye
Secundaria	4	Parar todo el funcionamiento al oprimir un interruptor de emergencia.	A	4-A	El sistema sigue funcionando al oprimir el interruptor de emergencia
Secundaria	5	Mantener una potencia mínima de 0.5 KW.	A	5-A	La potencia está por debajo de 0.5 KW
Secundaria	6	Restringir total o parcialmente el flujo de agua dentro del sistema.	A	6-A	El agua fluye libremente sin ninguna restricción
			B	6-B	Se conserva el flujo en el sistema después de ser restringido totalmente
Secundaria	7	Interrumpir el sistema cuando la temperatura del motor alcanza 80°C.	A	7-A	El motor se detiene antes de alcanzar la temperatura de 80°C
			B	7-B	El motor no se detiene al alcanzar la temperatura de 80°C
Secundaria	8	Mantener la temperatura de operación por debajo de 70°C.	A	8-A	La temperatura del fluido de descarga está por encima de 70°C
Secundaria	9	Mantener un nivel bajo de vibraciones	A	9-A	El equipo presenta altas vibraciones
Secundaria	10	Mantener un nivel bajo de ruido	A	10-A	El equipo tiene mas de 95 decibeles

#### 2.4.5 Modos de falla

Los modos de falla son los que causan el estado de falla en el equipo o inciden indirectamente para que este evento ocurra. La definición de los modos de falla consiste en establecer todas las fallas factibles, reales o potenciales, o similares

en equipos idénticos o afines. Se deben listar todas las fallas factibles con el fin de que al llevar a cabo las operaciones de mantenimiento se eliminen o controlen mediante su reparación o mantenimiento. Los modos de falla pueden ser físicos, de desgaste, humanos, etc. Se debe trabajar estrictamente con causas raíces y no con síntomas o efectos, ni con causas básicas o inmediatas ya que ellas no erradican el problema. Se presta más relevancia a la falla en sí y a su modo de falla que a los eventos o circunstancias anexas (Mora,2005,218).

Tabla 5. Clasificación de los modos de falla.

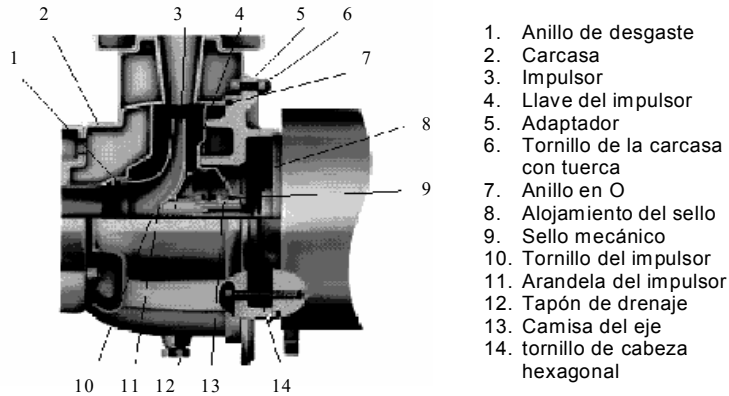
Modo de falla	Descripción
Falla completa	Se pierde totalmente la funcionalidad del sistema o equipo.
Falla parcial	El sistema opera adecuadamente pero con posibles restricciones.
Falla intermitente	La falla se presenta en forma discontinua en el tiempo. Lo ideal es que falle permanentemente para evaluar sus posibles causas raíces.
Falla con el tiempo	Sucede en elementos con el uso, el abuso, el desgaste, etc.
Sobre-desempeño de la función	El equipo se utiliza inadecuadamente por encima (o por debajo) de sus capacidades.

Henao y otros,2005.

- Modos de falla de una bomba centrífuga.

Una bomba centrífuga está compuesta básicamente por un elemento rotativo llamado rodete o impulsor, el cual se encuentra montado en el interior de una carcasa estacionaria (Velásquez y otro, 1992, 89).

Ilustración 7. Bomba centrífuga



Mcnaughton,1992,123.

Tabla 6. Modos de falla bomba centrífuga.

Tipo de falla	Lugar de la falla
Deformación	Eje de la bomba torcido
Separación	Impulsor dañado
Desgaste	Anillos de desgaste gastados
	Eje o camisa de eje gastados o rayados
	Fugas excesivas por las superficies sujetas a desgaste
	Cavitación
	Aireación
Desplazamiento	Ajuste incorrecto entre el eje de la bomba y el impulsor
	Cojinetes mal ajustados
	Bomba desalineada
	Impulsor desbalanceado
	Holgura excesiva entre el eje y la carcasa
	El sello mecánico ejerce excesiva presión contra el asiento
	El prensaestopas está excéntrico en relación con el eje
	Acoplamiento fuera de balance
	El impulsor roza con los anillos de desgaste
Soltura del eje	
Obstrucción	Desalineación entre la bomba y su propulsor
	Ranura de aceite en el cojinete obstruida
	Válvula de pie semiobstruida
	Impulsor o carcasa de la bomba obstruidos
	Obstrucciones en las tuberías de succión o descarga
	Salientes o rebabas en la trayectoria del fluido
Otros	Mugre en los cojinetes
	Cojinetes deficientes
	Sentido incorrecto de rotación del impulsor
	Resonancia entre la bomba y otros elementos del sistema

Mcnaughton,1992,124.

- Modos de falla de un motor eléctrico.

Los modos de falla del motor son basados en sus accesorios de conducción de energía.

Tabla 7. Modos de falla del motor eléctrico.

Tipo de falla	Lugar de la falla
Deformación	Eje torcido
Separación	Ruptura de las barras del motor
Desgaste	Cojinetes muy desgastados
Desplazamiento	Motor desalineado
	Acoplamiento fuera de balance
	Pesos de balanceo desplazados
	Excesivo juego axial
	Desbalanceo en el rotor
	Cojinetes sueltos en la superficie de montaje
Pérdida de conducción	Ventilador roza con el blindaje
	Fusibles fundidos
	Disparo de sobrecarga
	Estator en corto circuito
	Falla de potencia
	Caída de voltaje en la línea o bobinado del motor
	Capacitor del motor débil
No hay excitación de campo magnético	
Obstrucción	Ranura de aceite en el cojinete obstruida por suciedad
	Obstrucción en el ventilador del motor

Mcnaughton, 1992, 124.

Tabla 8. Fallas funcionales y sus respectivos modos de falla del sistema de bombeo.

Función	Código	Descripción de la función	Item falla funcional	Código de la falla funcional	Descripción de la falla funcional	Item del modo de falla	Código del modo de falla	Descripción del modo de falla
Primaria	0	Recircular agua en un sistema de bombeo cerrado sin dejar elevar la corriente por encima de 3.5 amperios y manteniendo un caudal mínimo de 17 galones por minuto.	A	0-A	El agua no circula	1	0-A-1	La tubería esta obstruida
						2	0-A-2	El motor está apagado
						3	0-A-3	No hay agua en el sistema
						4	0-A-4	Impulsor o carcaza de la bomba obstruida
						5	0-A-5	La válvula principal está cerrada
						6	0-A-6	El nivel del tanque está por debajo de la succión
						7	0-A-7	La bomba está trabajando en vacío
						8	0-A-8	Bolsa de aire en el tubo de succión
						9	0-A-9	Sentido incorrecto de rotación
						10	0-A-10	Falla mecánica
						11	0-A-11	Velocidad del sistema muy baja
						12	0-A-12	Margen insuficiente entre la presión de vapor y la presión de vacío
						13	0-A-13	Carga total del sistema mayor que la carga de proyecto de la bomba
						14	0-A-14	La granada está obstruida
						15	0-A-15	Impulsor dañado
			B	0-B	Se eleva la corriente por encima de 3.5 amperios	1	0-B-1	El motor se dispara porque la bomba trabaja en vacío
						2	0-B-2	Motor desalineado con la bomba
						3	0-B-3	Eje torcido del acople
						4	0-B-4	Impulsor desbalanceado
						5	0-B-5	Sentido incorrecto de rotación
						6	0-B-6	Impulsor deañado
						7	0-B-7	Falla mecánica
						8	0-B-8	Soltura del eje
						9	0-B-9	Cavitación
						10	0-B-10	Resonancia entre la bomba y otros elementos del sistema
						11	0-B-11	Obstrucción en la tubería de succión o descarga
						12	0-B-12	Impulsor o carcaza de la bomba obstruida
						13	0-B-13	Eje torcido del motor
			C	0-C	El caudal entregado por el sistema es menor de 17 galones por minuto.	1	0-C-1	La bomba ha perdido eficiencia
						2	0-C-2	Margen insuficiente entre la presión de vapor y la presión de vacío
						3	0-C-3	La tubería esta obstruida
						4	0-C-4	Velocidad del sistema muy baja
						5	0-C-5	La válvula principal está muy cerrada
						6	0-C-6	Carga total del sistema mayor que la carga de proyecto de la bomba
						7	0-C-7	Cuerpos extraños en el impulsor
						8	0-C-8	El motor está apagado
						9	0-C-9	La granada está obstruida
						10	0-C-10	Impulsor dañado
			D	0-D	El sistema se apaga	1	0-D-1	Se está sobrecalentando el motor
						2	0-D-2	Paro de emergencia defectuoso
						3	0-D-3	Transductor de presión malo
						4	0-D-4	Falla mecánica
5	0-D-5	Impulsor o carcaza de la bomba obstruida						
6	0-D-6	Obstrucción en la tubería de succión o descarga						

Función	Código	Descripción de la función	Item falla funcional	Código de la falla funcional	Descripción de la falla funcional	Item del modo de falla	Código del modo de falla	Descripción del modo de falla
Secundaria	1	Mantener la presión del sistema en un rango de 20 y 35 psi.	A	1-A	La presión del sistema está por debajo de 20 psi	1	1-A-1	Cantidad excesiva de aire o gas en el líquido
						2	1-A-2	Velocidad del sistema muy baja
						3	1-A-3	Sentido incorrecto de rotación
			4	1-A-4	Carga total del sistema mayor que la carga de proyecto de la bomba			
			5	1-A-5	La granada está obstruida			
			6	1-A-6	Impulsor dañado			
Secundaria	2	Encender y apagar todo el sistema en el momento de accionar un interruptor.	B	1-B	La presión del sistema está por encima de 35 psi	1	1-B-1	La válvula principal está cerrada
						2	1-B-2	La válvula de aforo está cerrada
						3	1-B-3	La válvula de contraflujo está cerrada
Secundaria	2	Encender y apagar todo el sistema en el momento de accionar un interruptor.	A	2-A	El sistema no enciende al accionar el interruptor	1	2-A-1	Switch de encendido defectuoso
			B	2-B	El sistema no apaga al accionar el interruptor	2	2-A-2	Switch de emergencia activado
Secundaria	3	Permitir la conservación del fluido dentro del sistema.	A	3-A	El nivel de agua disminuye	1	2-B-1	Switch de encendido defectuoso
						2	2-B-2	Switch de emergencia activado
Secundaria	3	Permitir la conservación del fluido dentro del sistema.	A	3-A	El nivel de agua disminuye	1	3-A-1	Filtración en el tanque
						2	3-A-2	Fuga en tubería o accesorios
						3	3-A-3	Evaporación excesiva
						4	3-A-4	La granada está obstruida
						5	3-A-5	Sello de la bomba defectuoso
Secundaria	4	Parar todo el funcionamiento al oprimir un interruptor de emergencia.	A	4-A	El sistema sigue funcionando al oprimir el interruptor de emergencia	1	4-A-1	Interruptor de paro de emergencia defectuoso
Secundaria	5	Mantener una potencia mínima de 0.5 KW.	A	5-A	La potencia está por debajo de 0.5 KW	1	5-A-1	Falla mecánica
						2	5-A-2	Caída de voltaje en la línea o bobinado del motor
						3	5-A-3	Capacitor débil o en corto circuito
						4	5-A-4	Motor desalineado con la bomba
						5	5-A-5	Desbalanceo en el rotor
						6	5-A-6	Eje torcido
						7	5-A-7	No hay excitación del campo magnético
						8	5-A-8	Acople desalineado
Secundaria	6	Restringir total o parcialmente el flujo de agua dentro del sistema.	A	6-A	El agua fluye libremente sin ninguna restricción	1	6-A-1	La válvula principal no funciona correctamente
						2	6-A-2	La válvula de contraflujo no funciona correctamente
						3	6-A-3	La válvula de aforo no funciona correctamente
Secundaria	6	Restringir total o parcialmente el flujo de agua dentro del sistema.	B	6-B	Se conserva el flujo en el sistema después de ser restringido totalmente	1	6-B-1	La válvula principal está obstruida
						2	6-B-2	La válvula de aforo está mala
						3	6-B-3	La válvula de contraflujo está mala
Secundaria	7	Interrumpir el sistema cuando la temperatura del motor alcanza 80°C.	A	7-A	El motor se detiene antes de alcanzar la temperatura de 80°C	1	7-A-1	Disparo de sobrecarga
						2	7-A-2	Falla mecánica
						3	7-A-3	Falla de potencia
						4	7-A-4	Caída de voltaje en la línea o bobinado del motor
						5	7-A-5	Capacitor débil o en corto circuito
			B	7-B	El motor no se detiene al alcanzar la temperatura de 80°C	1	7-B-1	Falla mecánica
						2	7-B-2	Estator en corto circuito
						3	7-B-3	Fusibles fundidos
						4	7-B-4	El disparo de sobrecarga del motor está malo

Función	Código	Descripción de la función	Item falla funcional	Código de la falla funcional	Descripción de la falla funcional	Item del modo de falla	Código del modo de falla	Descripción del modo de falla
Secundaria	8	Mantener la temperatura de operación por debajo de 70°C.	A	8-A	La temperatura del fluido de descarga está por encima de 70°C	1	8-A-1	La válvula principal está cerrada
						2	8-A-2	La válvula de aforo está cerrada
						3	8-A-3	El flujo del tanque está por encima de 70°C
						4	8-A-4	La válvula de contraflujo está cerrada
Secundaria	9	Mantener un nivel bajo de vibraciones	A	9-A	El equipo presenta altas vibraciones	1	9-A-1	La bomba está trabajando en vacío
						2	9-A-2	Motor desalineado con la bomba
						3	9-A-3	El eje de acople está torcido
						4	9-A-4	Impulsor dañado
						5	9-A-5	Las partes rotatorias rozan contra las partes fijas
						6	9-A-6	Rotor desequilibrado
						7	9-A-7	Empuje excesivo ocasionado por una falla mecánica dentro de la bomba
						8	9-A-8	Rodamientos defectuosos
						9	9-A-9	Turbulencias excesivas dentro del sistema
						10	9-A-10	Cavitación
						11	9-A-11	El sello está defectuoso
Secundaria	10	Mantener un nivel bajo de ruido	A	10-A	El equipo tiene mas de 95 decibeles	1	10-A-1	Rodamientos malos
						2	10-A-2	Las partes rotatorias rozan contra las partes fijas
						3	10-A-3	Aire en el sistema
						4	10-A-4	Ventilador roza con el blindaje
						5	10-A-5	Turbulencias excesivas dentro del sistema
						6	10-A-6	Bomba pegada
						7	10-A-7	Suciedad y cuerpos extraños dentro del sistema

#### 2.4.6 Consecuencias y efectos de los modos de falla

Las consecuencias de las fallas se miden mediante la evaluación del impacto de ellas sobre: la organización, las máquinas o sus componentes. La función principal de mantenimiento es atenuar o eliminar estas consecuencias mediante la utilización de las herramientas básicas o avanzadas, con las operaciones, las tácticas y la estrategia integral de mantenimiento. Es probable que las consecuencias sean más importantes que las características técnicas de las fallas en sí mismas (Mora,2005,218).

Los efectos de los modos de falla son los resultados de la falla sobre el sistema, diseño, proceso, o servicio. En esencia los efectos de las fallas tienen que ver con el cuestionamiento: ¿Qué pasaría si esto fallara? ¿Cuál o cuáles serían las consecuencias de la falla?. Se debe entender sin embargo que las fallas deben ser vistas desde dos puntos. El primer punto de vista es local, en el cual la falla es aislada y no afecta nada más. El segundo punto de vista es global, en el cual la falla puede afectar otras funciones y/o componentes. Generalmente hablando, la falla con efecto global es mucho más seria que una con efecto local (Stamatis,1995,78).

Las consecuencias resultantes de la ocurrencia de fallas en una función específica, pueden ser clasificadas según su efecto, así:

- Pérdida de vidas humanas.
- Pérdidas materiales mayores.
- Daños parciales o totales de equipos.
- Pérdidas de producción o servicios.
- Daños parciales o permanentes en el medio ambiente.

Las consecuencias de las fallas se clasifican según su categoría y se organizan de la siguiente manera:

Tabla 9. Clasificación de las consecuencias.

Categoría de las consecuencias	Descripción
Fallas ocultas	Normalmente no inciden directamente pero pueden llegar a generar paradas serias y catastróficas. Generalmente están en los sistemas de protección sin seguridad inherente.
Ambientales y de seguridad física y humana	Normas, leyes, contaminación, violación, seguridad, muertes, accidentes fatales, etc.
Operacionales	Pueden afectar la calidad, la seguridad, la cantidad, la atención al cliente, los reprocesos, los desperdicios, etc, además de la reparación.
No operacionales	Solo implican el costo de la reparación.

Henao y otros,2005.

#### 2.4.7 Medición del *RPN*

El número de riesgo prioritario (*RPN*) es el producto matemático de la seriedad de los efectos (severidad), de la probabilidad que una causa creará el incidente asociado a esos efectos (ocurrencia), y de una capacidad de detectar el incidente antes de que llegue al cliente (detección) (Henao,2005,108).

El valor *RPN* sirve para clasificar en un orden cada uno de los modos de falla que existen en un sistema. Una vez el *RPN* se ha determinado, se inicia la evaluación sobre la base de definición de riesgo (Método AMFE@, 2006).

El *RPN* jerarquiza cada una de las tareas a realizar en los diferentes elementos , con el fin de priorizar los esfuerzos en los equipos que más lo requieran acorde a su grado de criticidad.

El valor del *RPN* se calcula por medio de la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Cálculo del *RPN*

$$\begin{aligned} RPN &= Severidad \times Posibilidad \text{ de Ocurrencia} \times Probabilidad \text{ de Detección} \\ RPN &= S \times O \times D \end{aligned}$$

Mora,2005,219.

El cálculo de la Severidad se realiza en dos partes, la primera asigna unos valores probabilísticos a cada criterio y la segunda se obtiene por análisis y discusión al utilizar las tablas internacionales de valores de los distintos criterios de severidad (Mora,2005,219).

La calificación de la Severidad se realiza mediante seis criterios:

- FO - Fallos Ocultos
- SF - Impacto Seguridad Física
- MA - Impacto Medio Ambiente
- IC - Impacto en Imagen Corporativa
- OR - Costos de Reparaciones o Mantenimientos
- OC - Efectos en Clientes

Ecuación 2. Cálculo de la severidad.

$$Severidad = FO \times K_{FO} + SF \times K_{SF} + MA \times K_{MA} + IC \times K_{IC} + OR \times K_{OR} + OC \times K_{OC} = S$$

Mora,2005,220.

Donde los coeficientes de los factores son constantes (su suma es de 1.0 o del 100%), así:

$$\begin{array}{l} K_{FO} = 0.05 \text{ ó } 5\% ; K_{SF} = 0.20 \text{ ó } 20\% ; K_{MA} = 0.10 \text{ ó } 10\% ; \\ K_{IC} = 0.30 \text{ ó } 30\% ; K_{OR} = 0.30 \text{ ó } 30\% ; K_{OC} = 0.05 \text{ ó } 5\% \end{array}$$

Mora,2005,220.

Los valores de los criterios de Severidad (FO, SF, MA, etc.), de Ocurrencia y de Detección se discuten acorde al caso específico y a las circunstancias, mediante la obtención de los valores a partir de las siguientes opciones:

Tabla 10. Valores de los criterios de severidad, ocurrencia y detección.

Criterios		Descripción	Valor
SEVERIDAD	FO - Fallos Ocultos	No existen fallas ocultas que puedan generar fallas múltiples posteriores	0
		Existe una baja posibilidad que la falla NO sea detectada y ocasione fallas múltiples posteriores	1
		En condiciones normales la falla siempre será oculta y generará fallas múltiples posteriores	2
		Existe una baja posibilidad que la falla SI sea detectada y ocasione fallas múltiples posteriores	3
		La falla siempre es oculta y ocasionará fallas múltiples graves en el sistema	4
	SF - Seguridad Física	No afecta personas ni equipos	0
		Afecta a una persona y es posible que genere incapacidad de tipo temporal	1
		Afecta de dos a cinco personas y puede generar incapacidad de tipo temporal	2
		Afecta a más de cinco personas y puede generar incapacidad de tipo temporal o permanente	3
		Genera incapacidad permanente o la muerte a una o más personas	4
	MA - Medio Ambiente	No afecta el medio ambiente	0
		Afecta el MA pero se puede controlar. No daña el ecosistema	1
		Afecta la disponibilidad de recursos sociales y el ecosistema. Es reversible en menos de seis meses con un valor inferior a 1.000.000 pesos.	2
		Afecta la disponibilidad de recursos sociales y el ecosistema. Es reversible en menos de tres años con un valor inferior a 1.000.000 pesos.	3
	IC - Imagen Corporativa	Afecta los recursos sociales y el ecosistema. Es reversible en más de tres años o es irreversible. Su impacto social y ecológico es superior a 1.000.000 pesos.	4
		No es relevante	0
		Afecta credibilidad de clientes pero se maneja con argumentos	1
		Afecta credibilidad de clientes pero se maneja con argumentos e inversión inferior a 250.000 pesos	2
	OR - Costos de Reparación	Afecta credibilidad de clientes pero se maneja con argumentos e inversión entre 250.000 y 500.000 pesos	3
		Afecta credibilidad de clientes pero se maneja con argumentos e inversión mayor a 500.000 pesos. Puede ser irreversible	4
		Entre 1 y 50.000 pesos	0
		Entre 50.000 y 250.000 pesos	1
		Entre 250.000 y 500.000 pesos	2
	OC - Efectos en Clientes	Entre 500.000 y 1.000.000 pesos	3
		Mayor a 1.000.000	4
		Entre 1 y 50.000 pesos	0
		Entre 50.000 y 250.000 pesos	1
		Entre 250.000 y 500.000 pesos	2
	OCURRENCIA	Entre 500.000 y 1.000.000 pesos	3
		Mayor a 1.000.000	4
Frecuente (1 falla en 2 semanas)		4	
Ocasional (1 falla en 1 mes)		3	
DETECCIÓN	Remota (1 falla en 1 año)	2	
	Poco probable (1 falla en 5 años)	1	
	Nula	No se puede detectar una causa potencial. Mecanismo y modo de fallo subsecuente	4
	Baja	Baja probabilidad para detectar causas potenciales. Mecanismos y modos de fallos subsecuentes	3
	Media	Mediana probabilidad para detectar causas potenciales. Mecanismos y modos de fallos subsecuentes	2
	Segura	Siempre se detectarán causas potenciales. Mecanismos y modos de fallos subsecuentes	1

Mora,2005,221.

Luego que se califica la severidad, se analiza la posibilidad de ocurrencia y la probabilidad de detección en cada uno de los modos de falla del sistema de bombeo y se procede a calcular el valor del *RPN*.

Tabla 11. Cálculo del RPN y jerarquización de ejecución de las tareas.

Código del modo de falla	Descripción del modo de falla	Calificación severidad						RPN				Jerarquización de ejecución de las tareas
		FO	SF	MA	IC	OR	OC	S	O	D	Valor RPN	
0-A-1	La tubería esta obstruida	3	0	0	1	0	0	0.450	2	1	0.9	81
0-A-2	El motor está apagado	0	0	0	1	1	0	0.600	4	1	2.4	41
0-A-3	No hay agua en el sistema	3	0	0	0	1	0	0.450	4	2	3.6	12
0-A-4	Impulsor o carcaza de la bomba obstruida	3	0	0	2	1	0	1.050	2	2	4.2	8
0-A-5	La válvula principal está cerrada	2	0	0	0	0	0	0.100	4	1	0.4	90
0-A-6	El nivel del tanque está por debajo de la succión	4	0	0	0	1	0	0.500	4	3	6.0	2
0-A-7	La bomba está trabajando en vacío	3	0	0	0	1	0	0.450	4	3	5.4	4
0-A-8	Bolsa de aire en el tubo de succión	1	0	0	0	1	0	0.350	2	2	1.4	67
0-A-9	Sentido incorrecto de rotación	1	0	0	0	0	0	0.050	2	1	0.1	106
0-A-10	Falla mecánica	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	15
0-A-11	Velocidad del sistema muy baja	1	0	0	0	0	0	0.050	2	2	0.2	97
0-A-12	Margen insuficiente entre la presión de vapor y la presión de vacío	1	0	0	0	0	0	0.050	2	2	0.2	98
0-A-13	Carga total del sistema mayor que la carga de proyecto de la bomba	1	0	0	1	1	0	0.650	2	2	2.6	33
0-A-14	La granada está obstruida	3	0	0	1	0	0	0.450	2	3	2.7	31
0-A-15	Impulsor dañado	1	0	0	1	1	0	0.650	1	2	1.3	78
0-B-1	El motor se dispara porque la bomba trabaja en vacío	4	0	0	0	1	0	0.500	2	2	2.0	60
0-B-2	Motor desalineado con la bomba	3	0	0	1	1	0	0.750	1	3	2.3	47
0-B-3	Eje torcido del acople	3	0	0	1	1	0	0.750	1	3	2.3	48
0-B-4	Impulsor desbalanceado	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	16
0-B-5	Sentido incorrecto de rotación	1	0	0	0	0	0	0.050	2	1	0.1	107
0-B-6	Impulsor dañado	1	0	0	1	1	0	0.650	1	2	1.3	79
0-B-7	Falla mecánica	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	17
0-B-8	Soltura del eje	3	0	0	0	0	0	0.150	2	2	0.6	88
0-B-9	Cavitación	1	0	0	0	1	0	0.350	2	3	2.1	54
0-B-10	Resonancia entre la bomba y otros elementos del sistema	1	0	0	0	1	0	0.350	2	2	1.4	68
0-B-11	Obstrucción en la tubería de succión o descarga	3	0	0	1	0	0	0.450	2	2	1.8	61
0-B-12	Impulsor o carcaza de la bomba obstruida	3	0	0	2	1	0	1.050	2	2	4.2	9
0-B-13	Eje torcido del motor	3	0	0	1	1	0	0.750	1	3	2.3	49
0-C-1	La bomba ha perdido eficiencia	1	0	0	0	1	0	0.350	2	3	2.1	55
0-C-2	Margen insuficiente entre la presión de vapor y la presión de vacío	1	0	0	0	0	0	0.050	2	2	0.2	99
0-C-3	La tubería esta obstruida	3	0	0	1	0	0	0.450	2	1	0.9	82
0-C-4	Velocidad del sistema muy baja	1	0	0	0	0	0	0.050	2	2	0.2	100
0-C-5	La válvula principal está muy cerrada	2	0	0	0	0	0	0.100	4	2	0.8	83
0-C-6	Carga total del sistema mayor que la carga de proyecto de la bomba	1	0	0	1	1	0	0.650	2	2	2.6	34
0-C-7	Cuerpos extraños en el impulsor	3	0	0	1	1	0	0.750	2	3	4.5	6
0-C-8	El motor está apagado	0	0	0	1	1	0	0.600	4	1	2.4	42
0-C-9	La granada está obstruida	3	0	0	1	0	0	0.450	2	2	1.8	62
0-C-10	Impulsor dañado	1	0	0	1	1	0	0.650	2	2	2.6	35
0-D-1	Se está sobrecalentando el motor	2	0	0	1	1	0	0.700	2	2	2.8	29
0-D-2	Interruptor de paro de emergencia defectuoso	4	1	0	0	1	0	0.700	2	4	5.6	3
0-D-3	Transductor de presión malo	1	0	0	1	1	0	0.650	2	1	1.3	80
0-D-4	Falla mecánica	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	18
0-D-5	Impulsor o carcaza de la bomba obstruida	3	0	0	2	1	0	1.050	2	2	4.2	10
0-D-6	Obstrucción en la tubería de succión o descarga	3	0	0	1	0	0	0.450	2	2	1.8	63
1-A-1	Cantidad excesiva de aire o gas en el líquido	1	0	0	0	1	0	0.350	2	2	1.4	69
1-A-2	Velocidad del sistema muy baja	1	0	0	0	0	0	0.050	2	2	0.2	101
1-A-3	Sentido incorrecto de rotación	1	0	0	0	0	0	0.050	2	1	0.1	108
1-A-4	Carga total del sistema mayor que la carga de proyecto de la bomba	1	0	0	1	1	0	0.650	2	2	2.6	36
1-A-5	La granada está obstruida	3	0	0	1	0	0	0.450	2	2	1.8	64
1-A-6	Impulsor dañado	1	0	0	1	1	0	0.650	2	2	2.6	37
1-B-1	La válvula principal está cerrada	2	0	0	0	0	0	0.100	4	1	0.4	91
1-B-2	La válvula de aforo está cerrada	2	0	0	0	0	0	0.100	4	1	0.4	92
1-B-3	La válvula de contraflujo está cerrada	2	0	0	0	0	0	0.100	4	1	0.4	93
2-A-1	Switch de encendido defectuoso	1	0	0	0	1	0	0.350	2	1	0.7	84
2-A-2	Switch de emergencia activado	1	0	0	0	1	0	0.350	2	1	0.7	85
2-B-1	Switch de encendido defectuoso	1	0	0	0	1	0	0.350	2	3	2.1	56
2-B-2	Switch de emergencia activado	1	0	0	0	1	0	0.350	2	1	0.7	86
3-A-1	Filtración en el tanque	4	0	0	1	1	0	0.800	1	4	3.2	14
3-A-2	Fuga en tubería o accesorios	1	0	0	1	1	0	0.650	2	2	2.6	38
3-A-3	Evaporación excesiva	3	0	0	0	1	0	0.450	2	4	3.6	13
3-A-4	La granada está obstruida	3	0	0	1	0	0	0.450	2	2	1.8	65
3-A-5	El sello de la bomba está defectuoso	2	0	0	0	1	0	0.400	2	3	2.4	43
4-A-1	Interruptor de paro de emergencia defectuoso	4	1	0	0	1	0	0.700	1	4	2.8	30
5-A-1	Falla mecánica	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	19
5-A-2	Caída de voltaje en la línea o bobinado del motor	1	0	0	0	0	0	0.050	2	2	0.2	102
5-A-3	Capacitor débil o en corto circuito	1	0	0	0	1	0	0.350	2	2	1.4	70
5-A-4	Motor desalineado con la bomba	3	0	0	1	1	0	0.750	1	3	2.3	50
5-A-5	Desbalanceo en el rotor	4	0	0	2	1	0	1.100	1	2	2.2	52
5-A-6	Eje torcido del motor	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	20
5-A-7	No hay excitación del campo magnético	1	0	0	0	0	0	0.050	2	2	0.2	103
5-A-8	Acople desalineado	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	21

Código del modo de falla	Descripción del modo de falla	Calificación severidad						RPN			Jerarquización de ejecución de las tareas	
		FO	SF	MA	IC	OR	OC	S	O	D		Valor RPN
6-A-1	La válvula principal no funciona correctamente	3	0	0	1	1	0	0.750	1	4	3.0	22
6-A-2	La válvula de contraflujo no funciona correctamente	3	0	0	2	1	0	1.050	1	2	2.1	57
6-A-3	La válvula de aforo no funciona correctamente	3	0	0	2	1	0	1.050	1	2	2.1	58
6-B-1	La válvula principal está obstruida	3	0	0	0	0	0	0.150	2	2	0.6	89
6-B-2	La válvula de aforo está mala	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	23
6-B-3	La válvula de contraflujo está mala	3	0	0	2	1	0	1.050	2	2	4.2	11
7-A-1	Disparo de sobrecarga	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	24
7-A-2	Falla mecánica	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	25
7-A-3	Falla de potencia	1	0	0	0	0	0	0.050	2	2	0.2	104
7-A-4	Caída de voltaje en la línea o bobinado del motor	1	0	0	0	0	0	0.050	2	2	0.2	105
7-A-5	Capacitor débil o en corto circuito	1	0	0	0	1	0	0.350	2	2	1.4	71
7-B-1	Falla mecánica	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	26
7-B-2	Estatador en corto circuito	1	0	0	0	1	0	0.350	2	2	1.4	72
7-B-3	Fusibles fundidos	1	0	0	1	1	0	0.650	2	2	2.6	39
7-B-4	El disparo de sobrecarga del motor está malo	4	0	0	1	1	0	0.800	2	4	6.4	1
8-A-1	La válvula principal está cerrada	2	0	0	0	0	0	0.100	4	1	0.4	94
8-A-2	La válvula de aforo está cerrada	2	0	0	0	0	0	0.100	4	1	0.4	95
8-A-3	El flujo del tanque está por encima de 70°C	4	1	0	1	1	0	1.000	1	3	3.0	27
8-A-4	La válvula de contraflujo está cerrada	2	0	0	0	0	0	0.100	4	1	0.4	96
9-A-1	La bomba está trabajando en vacío	3	0	0	0	1	0	0.450	4	3	5.4	5
9-A-2	Motor desalineado con la bomba	3	0	0	1	1	0	0.750	1	3	2.3	51
9-A-3	Eje torcido del acople	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	28
9-A-4	Impulsor dañado	1	0	0	1	1	0	0.650	2	2	2.6	40
9-A-5	Las partes rotatorias rozan contra las partes fijas	1	0	0	0	1	0	0.350	2	2	1.4	73
9-A-6	Rotor desequilibrado	4	0	0	2	1	0	1.100	1	2	2.2	53
9-A-7	Empuje excesivo ocasionado por una falla mecánica dentro de la bomba	3	0	0	1	1	0	0.750	2	3	4.5	7
9-A-8	Rodamientos defectuosos	2	0	0	0	1	0	0.400	2	3	2.4	44
9-A-9	Turbulencias excesivas dentro del sistema	1	0	0	0	1	0	0.350	2	2	1.4	74
9-A-10	Cavitación	1	0	0	0	1	0	0.350	2	3	2.1	59
9-A-11	El sello de la bomba está defectuoso	2	0	0	0	1	0	0.400	2	3	2.4	45
10-A-1	Rodamientos malos	2	0	0	0	1	0	0.400	2	3	2.4	46
10-A-2	Las partes rotatorias rozan contra las partes fijas	1	0	0	0	1	0	0.350	2	2	1.4	75
10-A-3	Aire en el sistema	2	0	0	0	1	0	0.400	2	2	1.6	66
10-A-4	Ventilador roza con el blindaje	1	0	0	0	1	0	0.350	2	2	1.4	76
10-A-5	Turbulencias excesivas dentro del sistema	1	0	0	0	1	0	0.350	2	2	1.4	77
10-A-6	Bomba pegada	1	0	0	0	1	0	0.350	2	1	0.7	87
10-A-7	Suciedad y cuerpos extraños dentro del sistema	3	0	0	1	0	0	0.450	2	3	2.7	32

En la tabla 11 se muestra además del cálculo del *RPN* la jerarquización de ejecución de las tareas que se obtiene a partir del resultado del *RPN*. Mientras más grande sea el *RPN* mayor será su jerarquía, así el modo de falla con código 7-B-4 que corresponde a *El disparo de sobrecarga del motor está malo*, obtuvo el mayor *RPN* de 6.4. Esta es la tarea con mayor jerarquía y por ende la que se debe realizar en primera instancia, pero dadas las circunstancias actuales se toma la decisión de atender la tarea con segunda mayor jerarquía correspondiente a 0-A-6 *El nivel del tanque está por debajo de la succión*, porque presenta una ocurrencia mucho más elevada que la tarea de mayor jerarquía.

Tabla 12. Modos de falla con *RPN* más altos.

Código del modo de falla	Descripción del modo de falla	RPN			Valor RPN
		S	O	D	
7-B-4	El disparo de sobrecarga del motor está malo	0.800	2	4	6.4
0-A-6	El nivel del tanque está por debajo de la succión	0.500	4	3	6.0
0-D-2	Interruptor de paro de emergencia defectuoso	0.700	2	4	5.6
0-A-7	La bomba está trabajando en vacío	0.450	4	3	5.4
0-C-7	Cuerpos extraños en el impulsor	0.750	2	3	4.5
9-A-7	Empuje excesivo ocasionado por una falla mecánica dentro de la bomba	0.750	2	3	4.5
0-A-4	Impulsor o carcasa de la bomba obstruida	1.050	2	2	4.2
6-B-3	La válvula de contraflujo está mala	1.050	2	2	4.2
0-A-3	No hay agua en el sistema	0.450	4	2	3.6
3-A-3	Evaporación excesiva	0.450	2	4	3.6
3-A-1	Filtración en el tanque	0.800	1	4	3.2
0-A-10	Falla mecánica	0.750	2	2	3.0

## 2.5 ACCIONES DE MANTENIMIENTO

Las acciones de mantenimiento que se presentan a continuación se definen a partir del análisis de fallas *FMECA* que establece los modos de falla y las características asociadas a ellos con lo cual se procede a enunciar qué tipo de tareas se deben realizar para reducir o eliminar las fallas.

Tabla 13. Acciones de mantenimiento del sistema de bombeo.

Código del modo de falla	Descripción del modo de falla	Tipo de tarea a realizar			
		Correctivas	Modificativas	Preventivas	Predictivas
0-A-1	La tubería esta obstruida			x	
0-A-2	El motor está apagado	x			
0-A-3	No hay agua en el sistema			x	
0-A-4	Impulsor o carcaza de la bomba obstruida			x	
0-A-5	La válvula principal está cerrada			x	
0-A-6	El nivel del tanque está por debajo de la succión		x		
0-A-7	La bomba está trabajando en vacío		x		
0-A-8	Bolsa de aire en el tubo de succión			x	
0-A-9	Sentido incorrecto de rotación	x			
0-A-10	Falla mecánica	x		x	x
0-A-11	Velocidad del sistema muy baja			x	
0-A-12	Margen insuficiente entre la presión de vapor y la presión de vacío		x		
0-A-13	Carga total del sistema mayor que la carga de proyecto de la bomba			x	
0-A-14	La granada está obstruida			x	
0-A-15	Impulsor dañado	x		x	x
0-B-1	El motor se dispara porque la bomba trabaja en vacío			x	
0-B-2	Motor desalineado con la bomba		x	x	
0-B-3	Eje torcido del acople	x	x		
0-B-4	Impulsor desbalanceado			x	
0-B-5	Sentido incorrecto de rotación	x			
0-B-6	Impulsor dañado	x		x	x
0-B-7	Falla mecánica	x		x	x
0-B-8	Soltura del eje			x	
0-B-9	Cavitación			x	
0-B-10	Resonancia entre la bomba y otros elementos del sistema				x
0-B-11	Obstrucción en la tubería de succión o descarga			x	
0-B-12	Impulsor o carcaza de la bomba obstruida			x	
0-B-13	Eje torcido del motor	x	x		
0-C-1	La bomba ha perdido eficiencia	x	x		
0-C-2	Margen insuficiente entre la presión de vapor y la presión de vacío		x		
0-C-3	La tubería esta obstruida			x	x
0-C-4	Velocidad del sistema muy baja			x	
0-C-5	La válvula principal está muy cerrada	x			
0-C-6	Carga total del sistema mayor que la carga de proyecto de la bomba			x	
0-C-7	Cuerpos extraños en el impulsor			x	
0-C-8	El motor está apagado	x			
0-C-9	La granada está obstruida			x	
0-C-10	Impulsor dañado	x		x	x
0-D-1	Se está sobrecalentando el motor		x	x	
0-D-2	Paro de emergencia defectuoso	x			
0-D-3	Transductor de presión malo	x			
0-D-4	Falla mecánica	x		x	x
0-D-5	Impulsor o carcaza de la bomba obstruida			x	
0-D-6	Obstrucción en la tubería de succión o descarga			x	
1-A-1	Cantidad excesiva de aire o gas en el líquido			x	
1-A-2	Velocidad del sistema muy baja			x	
1-A-3	Sentido incorrecto de rotación	x			
1-A-4	Carga total del sistema mayor que la carga de proyecto de la bomba			x	
1-A-5	La granada está obstruida			x	
1-A-6	Impulsor dañado	x		x	x
1-B-1	La válvula principal está cerrada			x	
1-B-2	La válvula de aforo está cerrada			x	
1-B-3	La válvula de contraflujo está cerrada			x	
2-A-1	Switch de encendido defectuoso	x			
2-A-2	Switch de emergencia activado	x			
2-B-1	Switch de encendido defectuoso	x			
2-B-2	Switch de emergencia activado	x			
3-A-1	Filtración en el tanque			x	
3-A-2	Fuga en tubería o accesorios	x		x	x
3-A-3	Evaporación excesiva			x	
3-A-4	La granada está obstruida			x	
3-A-5	Sello de la bomba defectuoso	x		x	
4-A-1	Interruptor de paro de emergencia defectuoso	x			

Código del modo de falla	Descripción del modo de falla	Tipo de tarea a realizar			
		Correctivas	Modificativas	Preventivas	Predictivas
5-A-1	Falla mecánica	x		x	x
5-A-2	Caída de voltaje en la línea o bobinado del motor			x	
5-A-3	Capacitor débil o en corto circuito	x			x
5-A-4	Motor desalineado con la bomba		x	x	
5-A-5	Desbalanceo en el rotor		x	x	
5-A-6	Eje torcido	x	x		
5-A-7	No hay excitación del campo magnético	x		x	
5-A-8	Acople desalineado			x	
6-A-1	La válvula principal no funciona correctamente	x		x	
6-A-2	La válvula de contraflujo no funciona correctamente	x		x	
6-A-3	La válvula de aforo no funciona correctamente	x		x	
6-B-1	La válvula principal está obstruida			x	
6-B-2	La válvula de aforo está mala	x			
6-B-3	La válvula de contraflujo está mala	x			
7-A-1	Disparo de sobrecarga	x			
7-A-2	Falla mecánica	x		x	x
7-A-3	Falla de potencia	x		x	x
7-A-4	Caída de voltaje en la línea o bobinado del motor			x	
7-A-5	Capacitor débil o en corto circuito	x			
7-B-1	Falla mecánica	x		x	x
7-B-2	Estator en corto circuito	x			
7-B-3	Fusibles fundidos	x			
7-B-4	El disparo de sobrecarga del motor está malo	x		x	
8-A-1	La válvula principal está cerrada			x	
8-A-2	La válvula de aforo está cerrada			x	
8-A-3	El flujo del tanque está por encima de 70°C			x	
8-A-4	La válvula de contraflujo está cerrada			x	
9-A-1	La bomba está trabajando en vacío			x	
9-A-2	Motor desalineado con la bomba		x	x	
9-A-3	El eje de acople está torcido				
9-A-4	Impulsor dañado	x		x	x
9-A-5	Las partes rotatorias rozan contra las partes fijas				x
9-A-6	Rotor desequilibrado	x			
9-A-7	Empuje excesivo ocasionado por una falla mecánica dentro de la bomba	x		x	x
9-A-8	Rodamientos defectuosos			x	x
9-A-9	Turbulencias excesivas dentro del sistema			x	
9-A-10	Cavitación			x	
9-A-11	El sello está defectuoso			x	
10-A-1	Rodamientos malos	x			
10-A-2	Las partes rotatorias rozan contra las partes fijas				x
10-A-3	Aire en el sistema			x	
10-A-4	Ventilador roza con el blindaje				x
10-A-5	Turbulencias excesivas dentro del sistema			x	
10-A-6	Bomba pegada			x	
10-A-7	Suciedad y cuerpos extraños dentro del sistema			x	

## 2.6 CONCLUSIÓN

De acuerdo con el capítulo anterior la metodología y las etapas para el desarrollo del *FMECA* son: definir función primaria y secundaria; establecer todas las fallas funcionales reales y potenciales conocidas; definir los modos de fallas; evaluar las consecuencias y los efectos de cada modo de falla con su falla y su función; medir el *RPN* mediante la evaluación de la severidad, la probabilidad de ocurrencia y la posibilidad de detección; establecer las acciones correctivas o planeadas; y por último medir nuevamente el *RPN*.

El procedimiento *FMECA* es una herramienta de gran ayuda para solucionar problemas que se tengan con los equipos, que proporciona una guía para llevar a cabo un mantenimiento acertado sobre los mismos y con un orden de prioridad. Sin embargo, cabe anotar que es sólo una herramienta, que únicamente se pueden obtener buenos resultados si se ejecuta paso a paso y se analizan los datos antes de tomar medidas, y que no se puede omitir el gran factor de la experiencia.

### 3 MEDICIÓN DE CMD

#### 3.1 OBJETIVO

Medir el CMD a partir del  $MTBMP$ ,  $MTBMc$ ,  $MTTR$ ,  $\overline{M}_{pt}$  para disponibilidad alcanzada durante cuatro meses como mínimo.

#### 3.2 INTRODUCCIÓN

Con la medición del CMD para el sistema de bombeo GEMI se pretende hacer un análisis de la frecuencia a la cual ocurren las fallas en el tiempo observando el desempeño de las funciones para las cuales fue diseñado, de la característica inherente de los elementos asociados a su capacidad de ser recuperados para el servicio cuando se realiza la tarea de mantenimiento bajo las condiciones especificadas y de la característica que resume cuantitativamente el perfil de funcionalidad de los equipos.

#### 3.3 INDICADORES DE CONFIABILIDAD

Los indicadores de confiabilidad son necesarios para la caracterización de la habilidad del sistema para desempeñar su operación, deben reflejar las propiedades esenciales de operación del sistema, ser entendibles desde el punto de vista físico, simples de calcular desde el diseño y sencillos de comprobar a la hora de su uso. En algunas ocasiones es imposible caracterizar un sistema con un solo indicador, pero al mismo tiempo, el número de indicadores de confiabilidad debe ser tan pequeño como sea posible. Igualmente la mayoría de los indicadores son de naturaleza estadística y dependen del tiempo (Gnedenko y otro, 1995,86).

### 3.3.1 Tiempo medio para fallar

El tiempo medio para fallar, *MTTF (mean time to failure)*, es la medida de la tendencia central o esperanza matemática de la distribución de vida asignada a la variable tiempo para fallar, la cual expresa el tiempo operado y se usa generalmente para elementos no reparables (Billinton y otro,1993,253).

### 3.3.2 Tiempo medio entre fallas

El tiempo medio entre fallas, *MTBF (mean time between failures)*, es el valor promedio o esperado de una variable aleatoria llamada tiempo entre fallas. Si el tiempo de reparación es muy corto comparado con el tiempo entre fallas, entonces el tiempo promedio entre fallas es prácticamente el mismo que el tiempo medio para fallar (Ramakumar,1993,9).

Ecuación 3. Definición del tiempo medio entre fallas.

$$MTBF = \frac{\sum TBF}{\# Fallas}$$

Blanchard y otros,1995,108.

### 3.3.3 Tiempo medio entre mantenimientos

El tiempo medio entre mantenimientos, *MTBM (mean time between maintenance)*, más que un indicador de confiabilidad es un indicador de la frecuencia de los mantenimientos y es función de la frecuencia de los mantenimientos planeados (preventivos) y no planeados (correctivos) (Blanchard y otros,1995,111).

Ecuación 4. Definición del tiempo medio entre mantenimientos.

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

Blanchard y otros,1995,111.

Donde:  $MTBMc$ : tiempo medio entre mantenimientos no planeados.

$MTB Mp$  : tiempo medio entre mantenimientos planeados (preventivo).

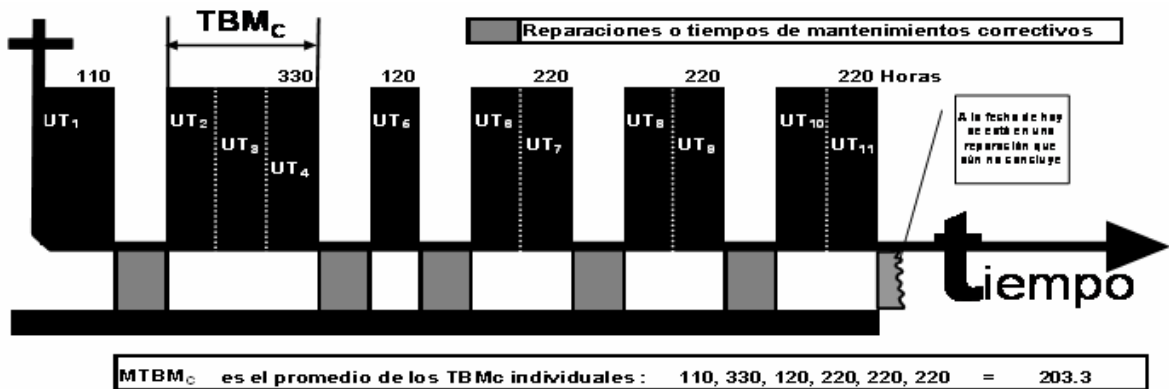
Ecuación 5. Definición tiempo medio entre mantenimientos correctivos.

$$MTBMc = \frac{\sum TBMc}{\# \text{ Fallas}}$$

Blanchard y otros,1995,111.

Donde:  $TBMc$ : tiempo útil de funcionamiento correcto sin fallas.

Ilustración 8. Representación gráfica para el cálculo del  $MTBMc$ .



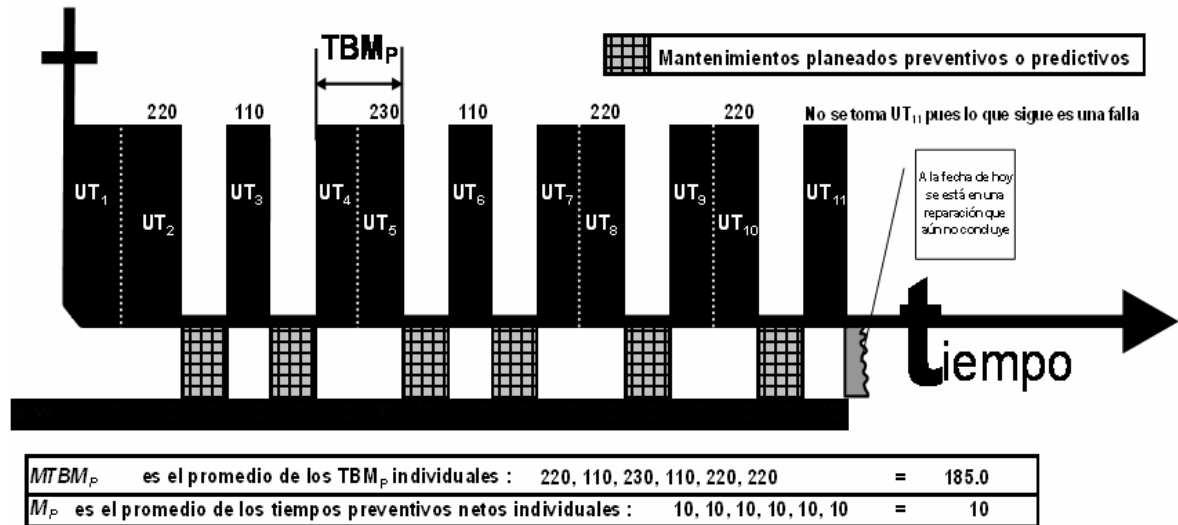
Vallejo,2006.

Ecuación 4. Definición tiempo medio entre mantenimientos preventivos.

$$MTB Mp = \frac{\sum TBMp}{\# \text{ Fallas}}$$

Blanchard y otros,1995,111.

Ilustración 9. Representación gráfica para el cálculo del  $MTBM_p$ .



Vallejo,2006.

### 3.4 INDICADORES DE MANTENIBILIDAD

Las acciones de mantenimiento se clasifican en mantenimiento planeado y no planeado.

El mantenimiento no planeado o correctivo es usado cuando el sistema presenta una falla o un mal funcionamiento. Su propósito es restaurar la operación del sistema tan pronto sea posible reemplazando, reparando o ajustando los componentes que han causado la interrupción del sistema (Brazovsky,1961,165), (Ramakumar,1993,129).

El mantenimiento planeado se ejecuta aún cuando el sistema esté funcionando satisfactoriamente. Su propósito es mantener el sistema en condiciones consistentes de desempeño, confiabilidad, aplicabilidad y seguridad a través de reemplazos, inspecciones revisiones, monitoreos, etc. Tal proceso prolonga la vida

del componente y disminuye el número de fallas (Brazovsky,1961,165) (Ramakumar,1993,129).

#### 3.4.1 Tiempo medio para reparar

El índice clave para la mantenibilidad es frecuentemente el tiempo medio para reparar, *MTTR (mean time to repair)*, o tiempo medio de mantenimiento correctivo, y se interpreta como un límite para el tiempo máximo de reparación. Cualitativamente, se refiere a la facilidad con que los equipos son restablecidos a su estado de funcionamiento, cuantitativamente es una probabilidad y se mide con base en el tiempo de parada por mantenimiento, incluyendo todos los tiempos por mantenimiento activo: diagnóstico, desarme, reemplazo y pruebas de verificación para saber si la reparación fue adecuada (Knezevic,1996,50).

Ecuación 6. Cálculo del tiempo medio para reparar

$$MTTR = \frac{\sum TTR}{\# Fallas}$$

Blanchard y otros,1995,115.

Donde: *TTR*: tiempo empleado para hacer el mantenimiento correctivo.

#### 3.4.2 Tiempo medio de mantenimiento preventivo

El tiempo medio de mantenimiento preventivo,  $\overline{M}_{pt}$  (*mean preventive maintenance time*), constituye el tiempo de todas aquellas actividades de mantenimiento que permiten mantener el sistema en las condiciones de desempeño específicas tales como inspecciones, calibraciones y reemplazo de piezas por tiempo, sin tener en cuenta los retardos administrativos y logísticos. Su objetivo es posponer la etapa de desgaste del sistema; mientras un buen programa de mantenimiento preventivo puede mejorar el desempeño del sistema y disminuir los tiempos de parada, una

mala programación de éste puede ser costosa e influir negativamente en su desempeño (Blanchard y otros,1995,107).

Ecuación 7. Definición del tiempo medio de mantenimiento preventivo.

$$\bar{M}_{pt} = \frac{\sum (M_{pt_i})(f_{pt_i})}{\sum f_{pt_i}}$$

Blanchard y otros,1995,107.

Donde:  $M_{pt}$  : duración de la actividad de mantenimiento.

$f_{pt}$  : frecuencia de la tarea de mantenimiento.

### 3.4.3 Tiempo medio de mantenimiento activo

El tiempo medio de mantenimiento activo,  $\bar{M}$  (*mean active maintenance time*), es el tiempo requerido para realizar cualquier tarea de mantenimiento. Es función de los tiempos medios de mantenimiento correctivo y preventivo y sus frecuencias relativas, sólo considera los tiempos activos de mantenimiento y no considera los tiempos administrativos y logísticos (Blanchard y otro,1995,108).

Ecuación 8. Definición del tiempo medio de mantenimiento activo.

$$\bar{M} = \frac{\frac{MTTR}{MTBMc} + \frac{\bar{M}_{pt}}{MTBMp}}{\frac{1}{MTBMc} + \frac{1}{MTBMp}}$$

Blanchard y otros,1995,108.

### 3.4.4 Tiempo de parada de mantenimiento

El tiempo de parada de mantenimiento,  $MDT$  (*maintenance down time*), constituye la suma total de los tiempos requeridos para reparar o restaurar un sistema a su

nivel de desempeño especificado, o mantenerlo en éste. Relaciona tanto los tiempos de mantenimiento correctivo y preventivo como los retrasos logísticos y administrativos (Blanchard y otro,1995,109).

Ecuación 9. Definición del tiempo de parada de mantenimiento.

$$MDT = \bar{M} + ADT + LDT$$

Blanchard y otros,1995,108.

Donde:  $\bar{M}$  : tiempo medio de mantenimiento activo.

$ADT$  : tiempo de retraso administrativo.

$LDT$  : tiempo de retraso logístico.

### 3.5 INDICADORES DE DISPONIBILIDAD

#### 3.5.1 Disponibilidad inherente

La disponibilidad inherente  $A_i$  del sistema, es la probabilidad de que el sistema opere satisfactoriamente cuando sea requerido en cualquier tiempo bajo las condiciones de operación especificadas y en un entorno ideal de soporte logístico, es decir, con la disponibilidad adecuada de personal, repuestos, herramientas, equipos de prueba y demás, sin considerar ninguna demora logística o administrativa (Blanchard y otro,1995,127). La disponibilidad inherente está basada únicamente en la distribución de fallas y la distribución de tiempo de reparación (Ebeling,1997,255).

Ecuación 10. Definición matemática de la disponibilidad inherente.

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Blanchard y otros,1995,127.

Donde:  $MTBF$  : tiempo medio entre fallas.

$MTTR$  : tiempo medio para reparar.

### 3.5.2 Disponibilidad alcanzada

La disponibilidad alcanzada  $A_a$ , es la probabilidad de que el sistema opere satisfactoriamente cuando sea requerido en cualquier tiempo bajo las condiciones de operación especificadas y en un entorno ideal de soporte logístico, sin considerar ningún retraso logístico o administrativo pero involucrando en sus cálculos los tiempos imputables a las tareas de mantenimiento preventivo.

Ecuación 11. Definición matemática de la disponibilidad alcanzada.

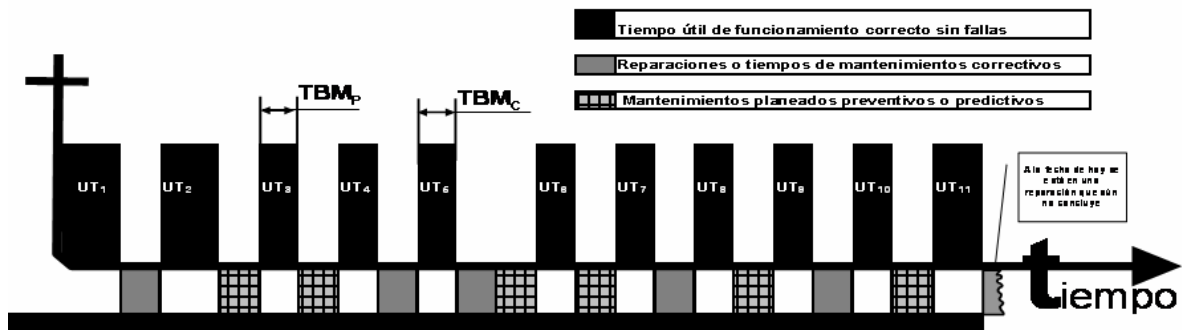
$$A_a = \frac{MTBM}{MTBM + \bar{M}}$$

Blanchard y otros,1995,127.

Donde:  $MTBM$  : tiempo medio entre mantenimientos.

$\bar{M}$  : tiempo medio de mantenimiento activo.

Ilustración 10. Representación gráfica del cálculo de la disponibilidad alcanzada.



Vallejo,2006.

### 3.5.3 Disponibilidad operacional

La disponibilidad operacional  $A_o$  es la probabilidad de que el sistema opere satisfactoriamente cuando sea requerido en cualquier momento bajo las condiciones de operación especificadas en un entorno real de soportes logísticos, abarcando por lo tanto, dentro de los tiempos de mantenimiento, los tiempos causados por los retrasos logísticos y administrativos, es decir, todos los tiempos concernientes al estado de reparación, incluyendo el mantenimiento programado y no programado.

Ecuación 12. Definición matemática de la disponibilidad operacional.

$$A_o = \frac{MTBM}{MTBM + MDT}$$

Blanchard y otros,1995,127.

### 3.6 DISTRIBUCION DE WEIBULL

Las distribuciones de probabilidad son un concepto fundamental de la estadística apoyado en el concepto de variable aleatoria (McClave,1993,67).

Una variable aleatoria es una función de valor real cuyo dominio es un espacio muestral, o aquella cantidad numérica o atributo resultante de la realización de un experimento aleatorio no conocido de antemano (\_\_\_\_,\_\_\_\_,\_\_\_\_).

La distribución de Weibull se selecciona para trabajar en este proyecto de grado ya que con ésta ha trabajado históricamente el grupo GEMI y han tenido buenos resultados para la cantidad de datos que analizan.

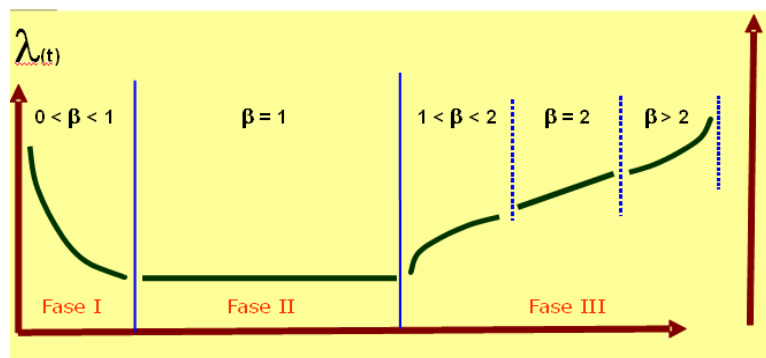
Esta distribución hace parte de las distribuciones continuas las cuales se caracterizan porque los valores de las variables pueden mezclarse y subdividirse con otros, es decir, pueden representarse por números enteros y decimales.

La distribución de Weibull es apropiada para modelar situaciones de tasa de fallas constante, estrictamente crecientes o estrictamente decrecientes. Esta distribución tiene dos parámetros y mediante su ajuste se puede obtener una variedad de formas en la curva para describir datos experimentales. Por su gran adaptabilidad esta distribución es extensamente usada en la ingeniería de confiabilidad (Ramakumar,1993,108).

La distribución de Weibull consta de dos parámetros: el parámetro de escala  $\eta$ , que determina el rango de la distribución, también llamado vida característica, y el parámetro de forma beta, que determina el intervalo de dispersión de los datos (Gnedenko y otro,1995,19).

En confiabilidad, las diferentes acciones que se decidan sobre las tareas a realizar por parte de mantenimiento y producción, dependen entre otros parámetros, de la curva de la bañera o Davies donde se muestra la evolución en el tiempo frente a la Tasa de Fallas  $\lambda(t)$  y el valor del parámetro de forma beta del equipo que se evalúa. Acorde al valor del equipo para ese momento, se selecciona si las tareas de mantenimiento deben ser correctivas, modificativas, preventivas o predictivas, al tener en cuenta la fase en que se encuentre el elemento o sistema (Mora,2005,77).

Ilustración 11. Curva de Davies.



Vallejo,2006.

El indicador de confiabilidad beta es una medida de dispersión del comportamiento de las fallas y es inverso a la duración promedio de éstas. En la fase I de la curva de Davies (ver ilustración 4), aparecen fallas que son impredecibles y de comportamiento atípico, en la fase II se empieza a tener cierto control sobre las fallas imprevistas y éstas empiezan a estabilizarse en tiempo de duración; normalmente desaparecen en esta fase II las fallas intempestivas y desconocidas, en la etapa I de la fase III las fallas se vuelven muy similares en tiempo y se conocen con antelación, en la zona II de la fase III la duración de las fallas tienden a estabilizarse y en la sección III de la fase III es donde ocurren fallas totalmente predecibles y sus tiempos de duración se normalizan totalmente (Mora,2005,77).

Ecuación 13. Función de densidad de la distribución de Weibull.

$$f(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\eta^\beta} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

Ramakumar,1993,108

Ecuación 14. Función de confiabilidad de la distribución de Weibull.

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

Ramakumar,1993,108

Ecuación 15. Función de tasa de fallas de la distribución de Weibull.

$$h(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\eta^\beta}$$

Ramakumar,1993,108

Donde:  $\beta$ : parámetro de forma de la distribución de Weibull.

$\eta$ : parámetro de escala de la distribución de Weibull.

Ecuación 16. Esperanza matemática de la distribución de Weibull.

$$[E] = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

Ramakumar,1993,108.

Ecuación 17. Varianza de la distribución de Weibull.

$$[E^2] = \eta \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]$$

Ramakumar,1993,108.

Donde:  $\Gamma$ : función gamma.

$\beta$ : parámetro de forma de la distribución de Weibull.

$\eta$ : parámetro de escala de la distribución de Weibull.

$E^2$ : segundo momento o varianza de la distribución.

### 3.7 MEDICIÓN CMD

Para la medición de CMD fue necesario describir una parte teórica en donde se involucran fórmulas, procedimientos y herramientas para poder llevar a cabo los cálculos y determinar la confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad.

En el objetivo se plantea que el CMD se va a medir a partir de los indicadores  $MTBMc$ ,  $MTBMp$ ,  $MTTR$  y  $\bar{M}_{pt}$  para disponibilidad alcanzada, sin embargo, se considera que es de gran importancia incluir otros tipos de disponibilidad que son la inherente y la operacional, con el fin de tener un punto de comparación mostrando las variaciones que se presentan cuando se tienen en cuenta los factores logísticos y administrativos.

### 3.7.1 Toma de datos

El primer paso para hacer la medición de CMD es la adquisición de los datos. Para este proyecto de grado se emplearon los datos que fueron tomados desde finales de marzo de 2005 hasta el mes de octubre de 2006. Los datos de operación se toman individualmente para cada motobomba ya que son subsistemas independientes.

Una de las funciones del grupo de investigación GEMI es hacer un seguimiento detallado del funcionamiento del sistema de bombeo para lo cual se lleva un registro de todos los eventos que ocurren. El procedimiento consiste en revisar periódicamente las bombas y en el momento que se apague alguna de ellas o que se presente una falla en alguno de los componentes del sistema, se registra la fecha y la hora en que ocurrió el suceso y la descripción correspondiente, luego cuando se corrigen las anomalías se registra también la fecha y la hora.

Tabla 14. Datos de un subsistema (bomba #1) en parte del intervalo de tiempo.

Fecha Inicio	Hora Inicio	Fecha Fin	Hora Fin	Descripción evento
28-Mar-2005	08:30 a.m.	28-Mar-2005	01:30 p.m.	Corte de luz
28-Mar-2005	03:15 p.m.	31-Mar-2005	02:00 a.m.	Corte de luz problemas de ceba
01-Abr-2005	11:20 a.m.	11-Abr-2005	10:40 a.m.	Se detienen por vaciado de tanque
14-Abr-2005	10:00 a.m.	20-Abr-2005	02:00 a.m.	Amanecen apagadas
20-Abr-2005	08:15 a.m.	25-Abr-2005	01:00 a.m.	Amanecen apagadas
25-Abr-2005	09:00 a.m.	26-Abr-2005	10:00 a.m.	Amanecen apagadas problema de ceba
26-Abr-2005	10:30 a.m.	01-May-2005	01:00 a.m.	Amanecen apagadas problema de ceba
02-May-2005	09:15 a.m.	10-May-2005	10:30 a.m.	Apagón general
10-May-2005	11:00 a.m.	23-May-2005	10:00 a.m.	Se detiene para toma de datos
26-May-2005	11:30 a.m.	23-Jun-2005	03:00 p.m.	Preventivo pintura
24-Jun-2005	02:30 p.m.	12-Jul-2005	11:40 a.m.	Apagón general
18-Jul-2005	08:30 a.m.	08-Sep-2005	11:00 a.m.	revisión
03-Oct-2005	03:30 p.m.	04-Oct-2005	08:45 a.m.	chequeo breakers lab.
05-Oct-2005	10:00 a.m.	12-Oct-2005	07:00 a.m.	Apagón general
12-Oct-2005	09:00 a.m.	26-Oct-2005	09:00 a.m.	fuga por calentamiento desceba
07-Dic-2005	12:00 p.m.	09-Dic-2005	10:30 a.m.	medición y vacaciones
20-Ene-2006	10:30 a.m.	16-Feb-2006	10:00 a.m.	Nivel de tanque Minimo
20-Feb-2006	12:00 p.m.	26-Feb-2006	10:00 a.m.	Apagadas desde el laboratorio todas
02-Mar-2006	09:30 a.m.	10-Mar-2006	03:00 p.m.	Apagón general
13-Mar-2006	10:00 a.m.	14-Mar-2006	02:30 p.m.	Apagón general
21-Mar-2006	10:00 a.m.	24-Mar-2006	12:00 p.m.	Falla software
6-Abr-06	09:00 a.m.	7-Abr-06	11:30 a.m.	Se apagan por semana santa
18-Abr-2006	10:00 a.m.	3-May-06	11:00 a.m.	Apagón
4-May-06	9:00 a.m.	8-May-06	08:30 a.m.	Sobrecalentamiento motor
8-May-06	10:00 a.m.	9-May-06	11:00 a.m.	Mtto general
18-May-06	11:00 a.m.	2-Jun-06	10:00 a.m.	Vacaciones
11-Jul-2006	09:00 a.m.	13-Jul-2006	02:00 a.m.	Amanece descebada
13-Jul-2006	09:30 a.m.	14-Jul-2006	12:00 p.m.	Corte eléctrico
17-Jul-2006	09:30 a.m.	21-Jul-2006	10:00 p.m.	Apagan seis
24-Jul-2006	09:00 a.m.	27-Jul-2006	01:00 a.m.	Amanecen apagadas
27-Jul-2006	08:10 a.m.	07-Ago-2006	08:00 a.m.	Corte eléctrico

### 3.7.2 Análisis de los datos

El análisis de los datos se hace para cada motobomba por lo que cada una es independiente y puede presentar fallas diferentes de las demás, aunque en algunos casos la falla puede ser la misma para todas.

En el análisis de los datos lo primero que se hace es calcular el tiempo de funcionamiento del equipo que corresponde al *UT (up time)* y el tiempo de parada *DT (down time)*. El paso que sigue a continuación es clasificar las paradas

determinando si son planeadas o no planeadas para calcular los tiempos entre mantenimientos preventivos y correctivos. Para la duración de éstos se hace una estimación teniendo en cuenta que no se toman los retrasos logísticos ni los administrativos.

Es preciso anotar que existen paradas que no están relacionadas con mantenimientos preventivos o correctivos ya que no se consideran fallas propias del sistema, como por ejemplo los apagones que se presentan tan frecuentemente y que no son fallas del sistema como tal.

### 3.7.3 Distribución de Weibull con el programa Valramor

El programa Valramor es una aplicación de Excel desarrollada por Juan Santiago Vallejo y Luis Mora del grupo de investigación GEMI. Esta aplicación tiene como función analizar la información registrada de los tiempos de funcionamiento y los tiempos de parada de los equipos. Valramor tiene la capacidad de hacer el análisis de los datos para calcular la confiabilidad y la mantenibilidad con diferentes métodos de estimación y diferentes distribuciones.

Los resultados arrojados por el programa se muestran a través de gráficas de probabilidades en el tiempo, gráficas de alineación y gráficas de las características de las fallas.

Ilustración 12. Ventana principal del programa Valramor.

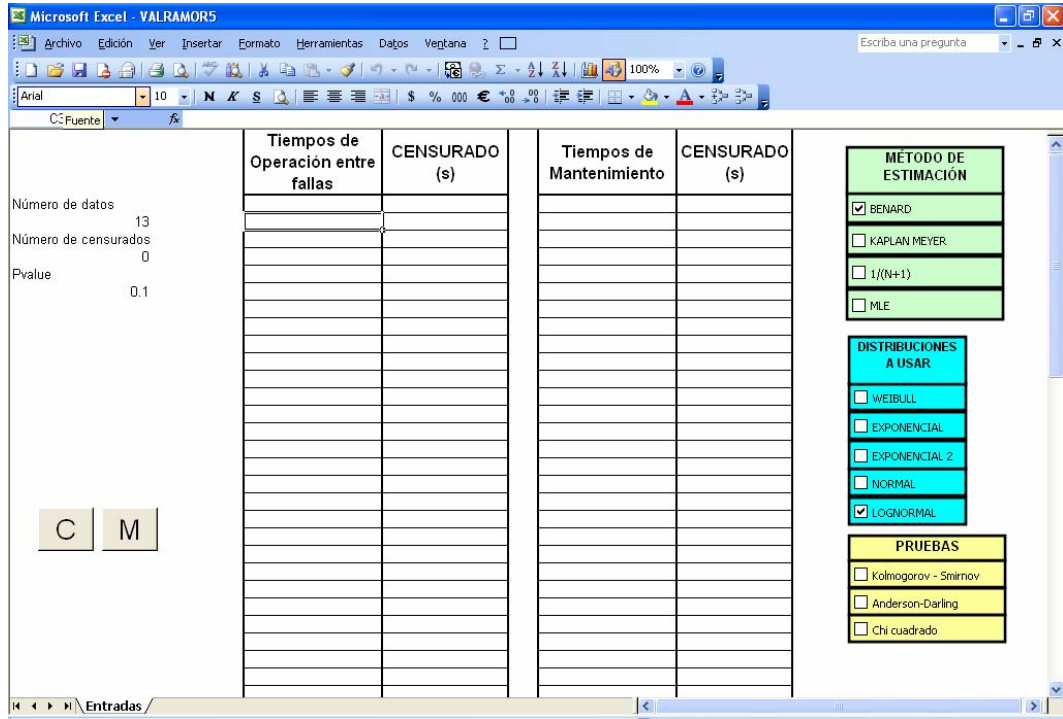
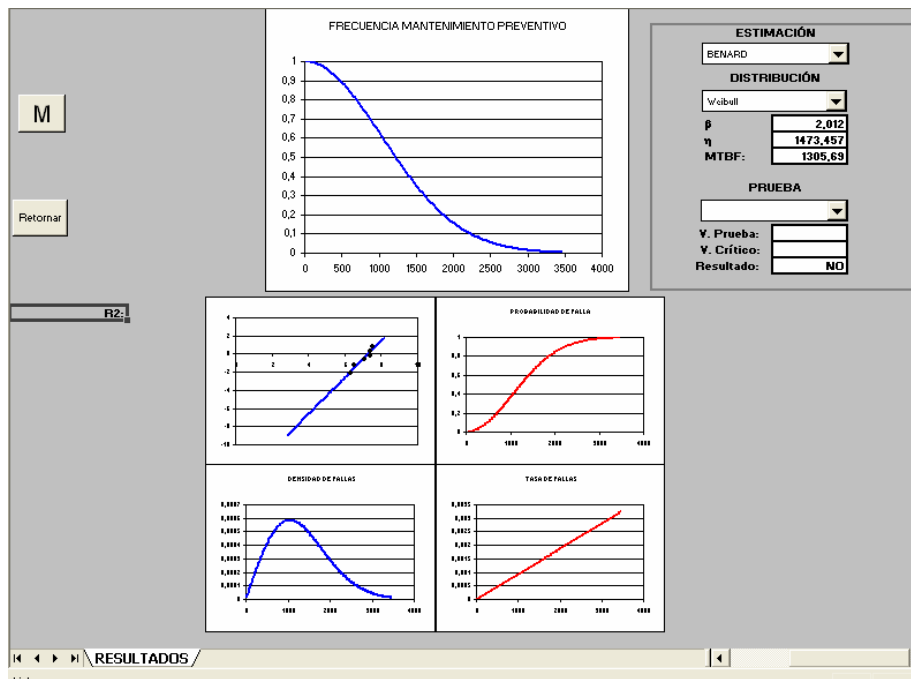


Ilustración 13. Gráficas con los resultados del análisis.



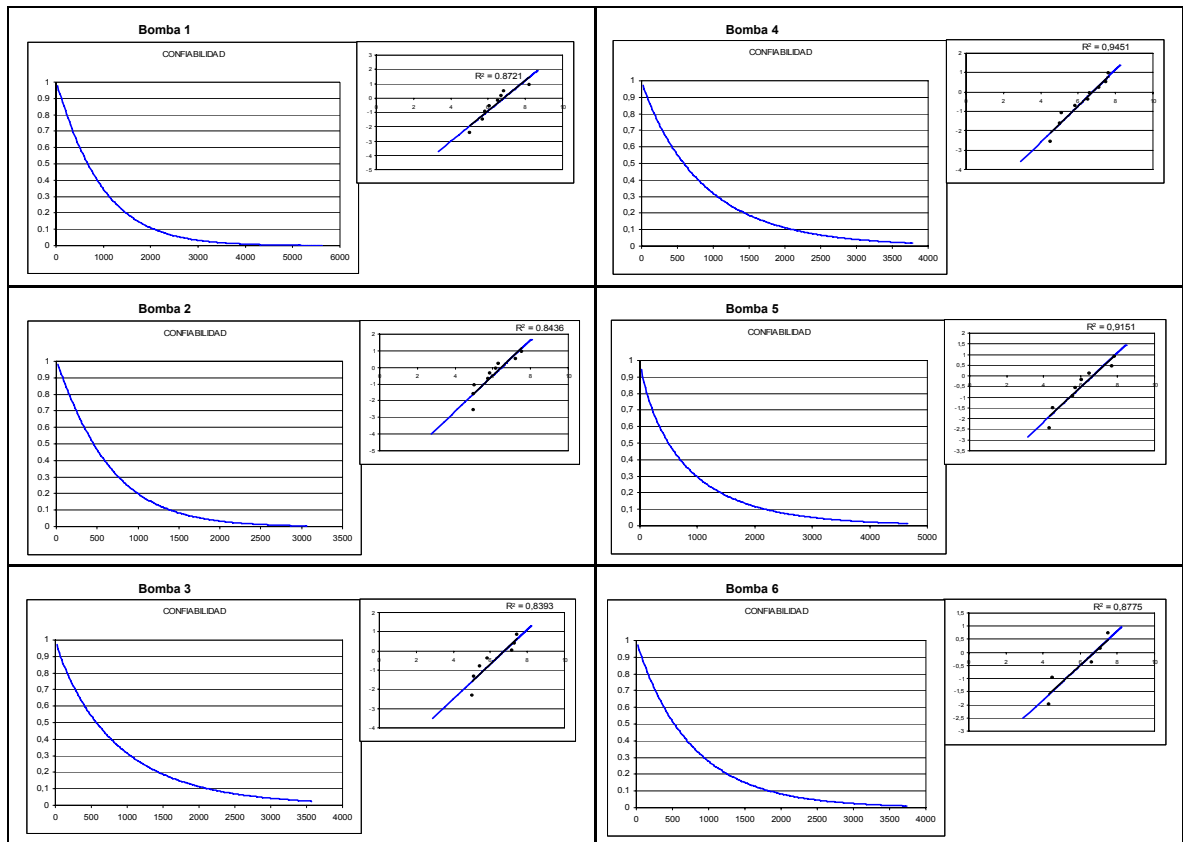
#### 3.7.4 Análisis de las gráficas obtenidas de la distribución de Weibull de cada bomba

Las gráficas que se obtienen a través del programa Valramor muestran en las mediciones de confiabilidad la probabilidad en el tiempo de que el equipo deba ser intervenido, y en las mediciones de mantenibilidad muestran la duración de las tareas de mantenimiento.

El análisis de las gráficas, con el fin de estandarizar los resultados, se hace para una confiabilidad y una mantenibilidad del 80%.

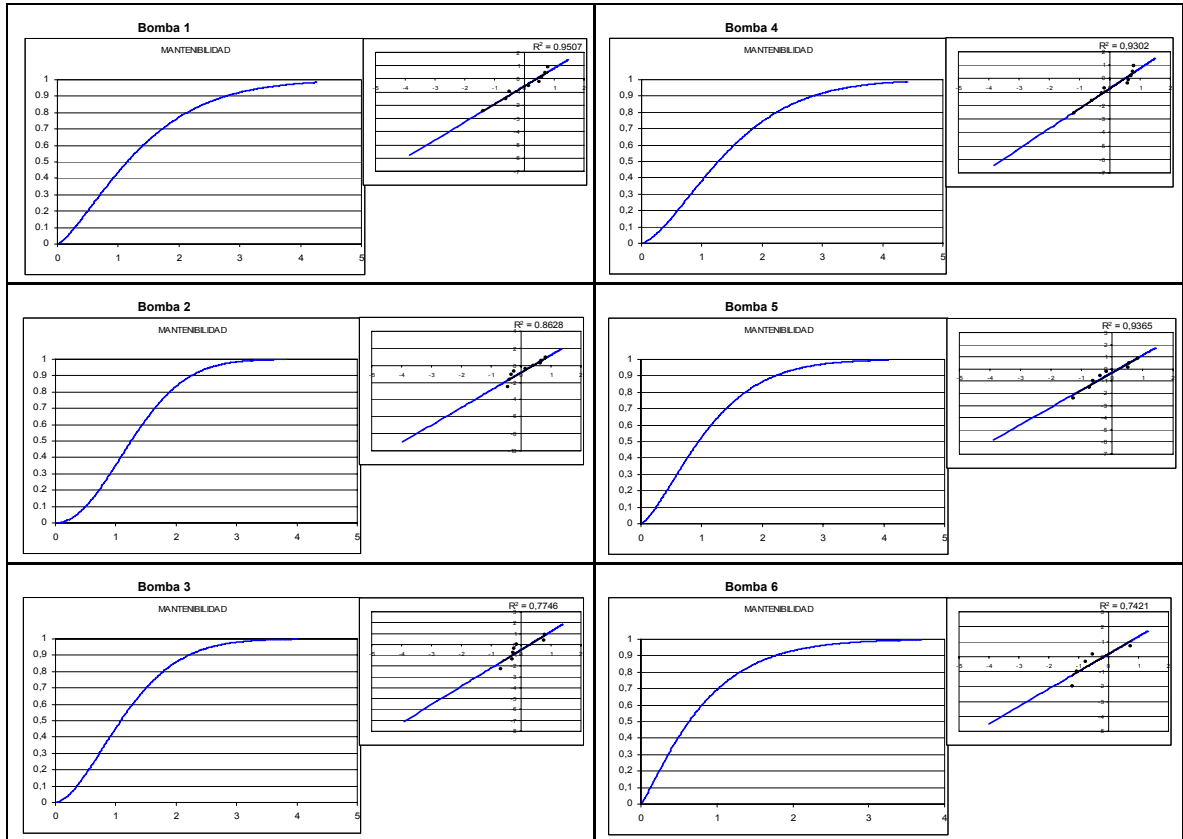
El programa de Valramor al hacer el análisis de los datos para obtener la confiabilidad y la mantenibilidad, realiza las gráficas de probabilidad en el tiempo y de proceso de alineación. El proceso de alineación consiste en realizar una transformación de los valores de probabilidad en el tiempo de tal manera que la distribución obtenga una forma lineal; con este proceso se puede comprobar si los datos se ajustan o no a la distribución de Weibull y también se tiene el coeficiente de correlación  $R^2$  que indica que tan bien se ajustan los datos a una línea recta.

Tabla 15. Gráficas del tiempo entre mantenimiento correctivo (*TBMc*). Probabilidad vs tiempo.



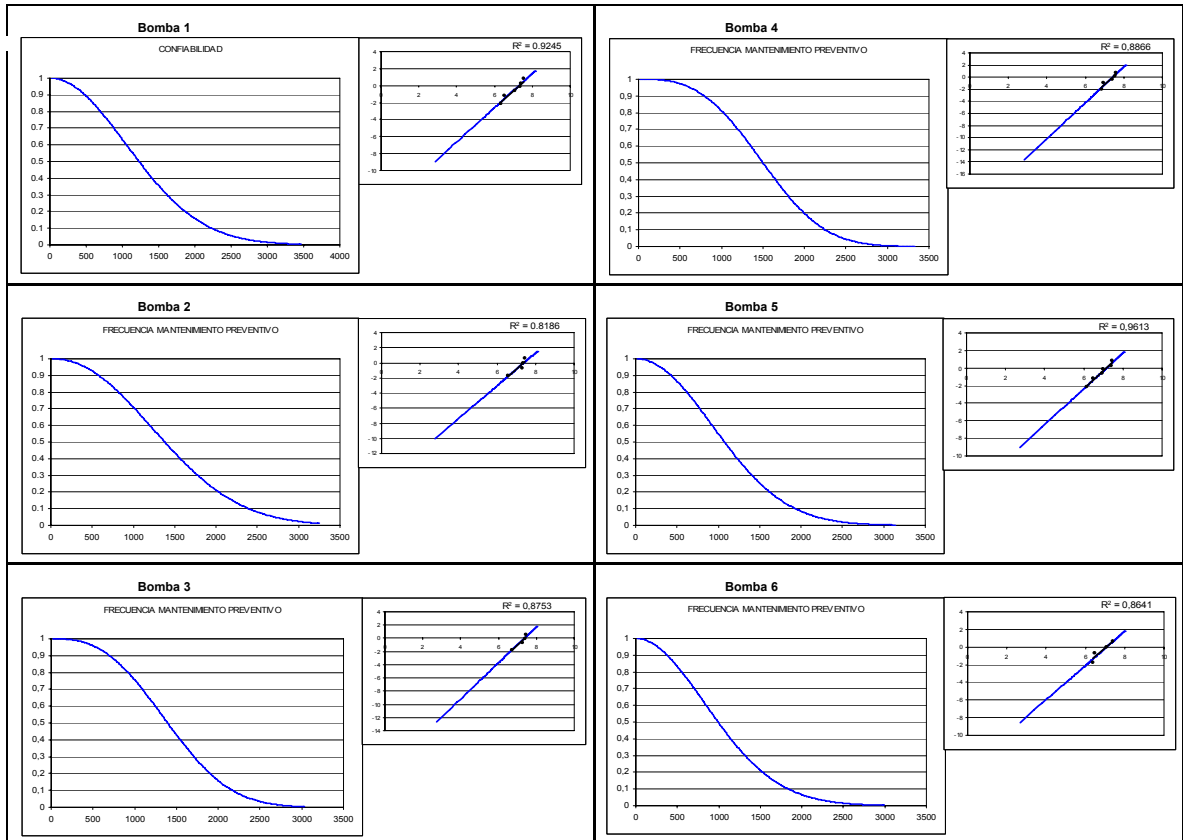
En la tabla 15 donde se muestran las gráficas del *TBMc*, se observa que el 80% de las veces la bomba #1 es capaz de sobrevivir 250 horas o más después de la falla; las bombas #2, #3 y #4 sobreviven 200 horas o más después de la falla; y las bombas #5 y #6 sobreviven 150 horas o más después de la falla. Con estos resultados se deduce que la bomba #1 es la que tiene un mayor tiempo útil de funcionamiento correcto sin fallas para una confiabilidad del 80%.

Tabla 16. Gráficas del tiempo para reparar (*TTR*). Probabilidad vs tiempo.



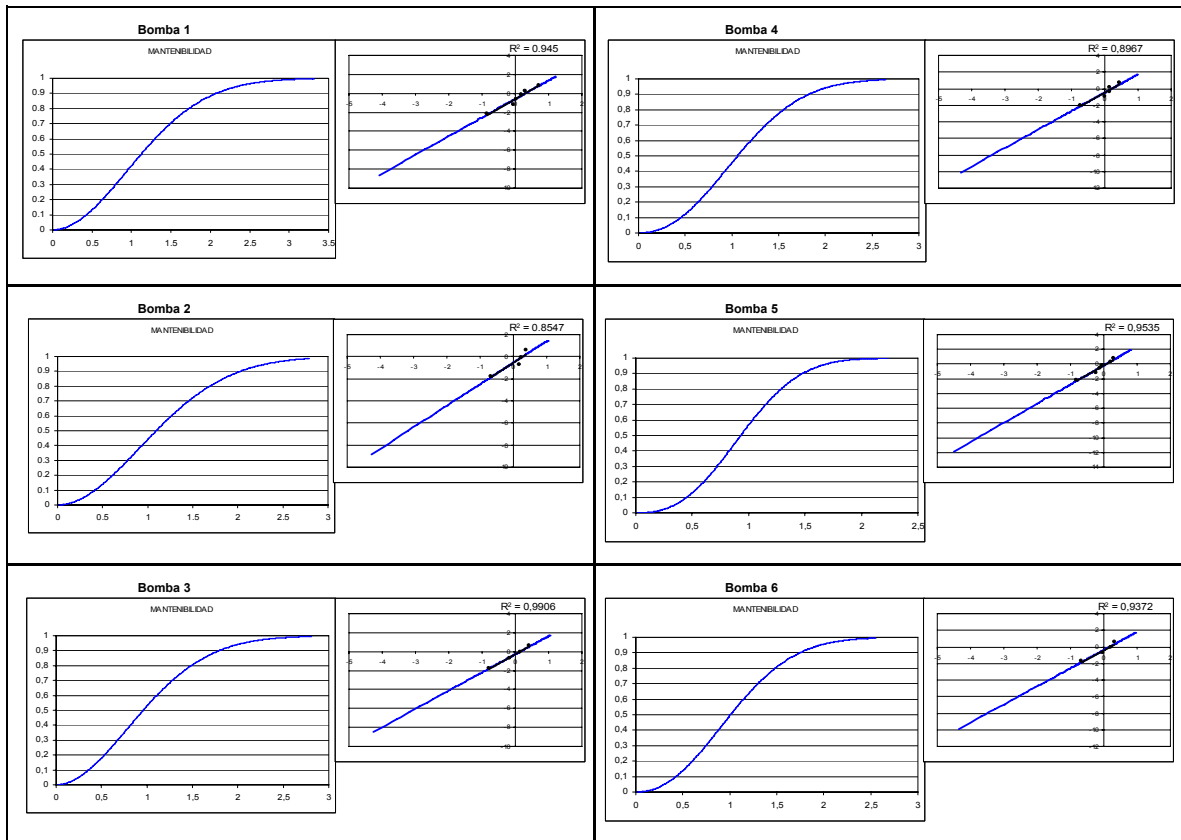
En las gráficas del *TTR* se interpreta que el mantenimiento correctivo dura menos de 2.2 horas el 80% de las veces para las bombas #1 y #4; para la bomba #2 dura menos de 2.0 horas; para las bombas #3 y #5 dura menos de 1.8 horas; y para la bomba #6 dura menos de 1.3 horas. En conclusión, el 80% de las tareas de mantenimiento correctivo se completan más rápidamente en la bomba #6 que en las demás bombas.

Tabla 17. Gráficas del tiempo entre mantenimiento preventivo (*TBMp*). Probabilidad vs tiempo.



Las gráficas correspondientes al *TBMp* indican que el 80% de las veces no se ha hecho mantenimiento preventivo antes de las 750 horas en la bomba #1; en la bomba #2 antes de las 850 horas; en la bomba #3 antes de las 900 horas; en la bomba #4 antes de las 1000 horas; en la bomba #5 antes de las 650 horas; y en la bomba #6 antes de las 600 horas. Con este resultado se comprueba que la bomba #4 es la que más ha estado en funcionamiento, y en función de ella se han generado los mantenimientos preventivos.

Tabla 18. Gráficas de la duración del mantenimiento preventivo (*Mpt*). Probabilidad vs tiempo.



El resultado de la gráfica asociada a *Mpt* permite deducir que el 80% de los mantenimientos preventivos duran menos de 1.7 horas para las bombas #1 y #2; para las bombas #3, #4 y #6 duran menos de 1.5 horas; y para la bomba #5 duran menos de 1.3 horas. El 80% de las tareas de mantenimiento preventivo se ejecutan más rápidamente en la bomba #5 que en las demás bombas.

### 3.7.5 Resultado de disponibilidades

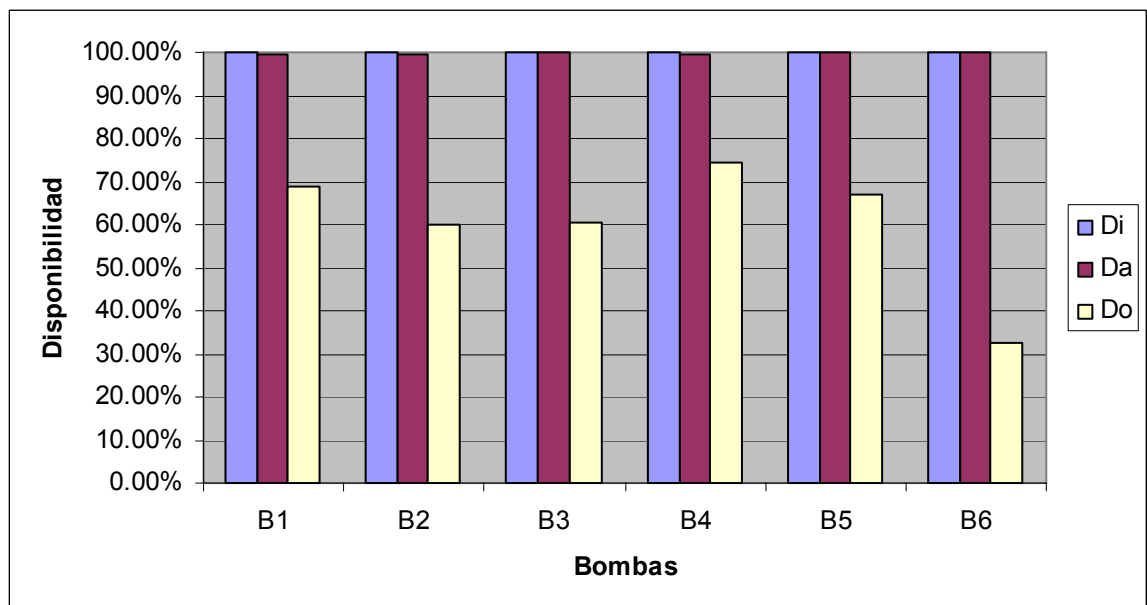
La tabla que se muestra a continuación contiene tanto los resultados de los indicadores de confiabilidad y mantenibilidad, como los resultados de la disponibilidad inherente, la alcanzada y la operacional que se calcularon con las

fórmulas mencionadas anteriormente en los indicadores de disponibilidad. Aunque el objetivo consiste en medir el CMD para la disponibilidad alcanzada, se considera que es de gran importancia incluir las disponibilidades inherente y operacional ya que de esta forma se tiene un punto de comparación y se pueden sacar conclusiones con fundamento.

Tabla 19. Resumen de los resultados de la medición del CMD.

	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3	Bomba 4	Bomba 5	Bomba 6
<i>MTBMc</i>	923.81	623.05	891.59	892.82	876.19	784.70
<i>MTBmp</i>	1305.7	1445.77	1419.5	1515.9	1138.1	1061.2
<i>MTBM</i>	541.02	435.41	547.62	561.88	495.06	451.12
<i>MTTR</i>	1.37	1.33	1.20	1.47	1.12	0.82
<i>Mpt</i>	1.20	1.17	1.03	1.11	0.95	1.06
<i>M</i>	1.30	1.28	1.13	1.34	1.05	0.92
<i>DT</i>	246.03	287.97	358.49	191.68	245.73	936.73
<i>Di</i>	99.85%	99.79%	99.87%	99.84%	99.87%	99.90%
<i>Da</i>	99.76%	99.71%	99.79%	99.76%	99.79%	99.80%
<i>Do</i>	68.74%	60.19%	60.44%	74.56%	66.83%	32.50%

Gráfica 1. Resultados de las disponibilidades inherente, alcanzada y operacional.



Las bombas presentan una disponibilidad inherente y una disponibilidad alcanzada muy buenas por lo que se consideran bajo un entorno ideal, pero en la disponibilidad operacional donde se tienen en cuenta las condiciones reales de las demoras por causa de la logística o de factores administrativos, los resultados no son tan buenos. Básicamente lo que pasa con el sistema de bombeo es que el tiempo requerido para hacer los mantenimientos correctivos y preventivos son cortos, pero en el proceso de adquisición de los repuestos se emplea mucho tiempo y es allí donde se presenta el problema.

### 3.8 CONCLUSIÓN

El registro de datos del comportamiento de los equipos es indispensable para tener una idea de que tan bien o que tan mal están funcionando los mismos ya que esta medición busca generar un control. Lo que no se mide no se puede controlar, y lo que no se mide no se puede mejorar.

La medición del CMD permite interpretar el estado de operación de los equipos con lo cual se pueden establecer medidas estratégicas para mejorar el rendimiento de los mismos y, en algunos casos, aumentar la productividad.

Los indicadores de confiabilidad y mantenibilidad establecen los parámetros que indican la capacidad de los equipos para permanecer funcionando correctamente y cómo se están comportando con los mantenimientos planeados y no planeados que se les hacen.

## 4 JERARQUIZACIÓN DE TAREAS

### 4.1 OBJETIVO

Replantear la jerarquización de las tareas proactivas y correctivas después de realizar las mediciones CMD.

### 4.2 INTRODUCCIÓN

Las tareas de mantenimiento pueden ser de carácter correctivo, preventivo, modificativo o predictivo. En el sistema de bombeo lo más común es que se realicen acciones correctivas y preventivas, siendo las correctivas más frecuentes.

El análisis de fallas *FMECA* procesado anteriormente se utiliza para desarrollar este objetivo, con el fin de emplear los resultados obtenidos con los cuales se pretende elaborar las tareas de mantenimiento. Asimismo, también se recurre a las mediciones CMD cuyos resultados permiten determinar las estrategias y acciones de mantenimiento.

### 4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS *RPN*

El análisis de los resultados *RPN* que se desarrolla a continuación muestra los diferentes tipos de tareas con las cuales se pretende intervenir los modos de falla que generan mayor impacto en el funcionamiento del sistema de bombeo. Este procedimiento se realiza después de haber hecho el primer cálculo del *RPN* en donde se jerarquizan los modos de falla.

#### 4.3.1 Tareas para reducir o eliminar los modos de falla

Las tareas utilizadas para la reducción o eliminación de los modos de falla del sistema de bombeo son las tareas correctivas y proactivas (preventivas, predictivas y modificativas).

- Tareas correctivas

Las tareas de mantenimiento correctivo son las tareas que se realizan con la intención de recuperar la funcionalidad del elemento o sistema, tras la pérdida de su capacidad para realizar la función o las prestaciones que se requieren.

Las tareas correctivas que se emplean en el sistema de bombeo son básicamente las que se presentan cuando las bombas se detienen después de haber estado funcionando un tiempo determinado y cuyas fallas pueden ser causadas por el desgaste normal de los componentes o que se haya hecho un mal montaje; un caso típico es cuando se presentan fugas en la tubería que por el uso normal y por las vibraciones generan fisuras y con ello la falla.

Existen otras tareas correctivas que se generan por causas externas que no dependen del sistema como tal, un modo de fallo correspondiente a estas causas externas es por ejemplo, cuando el motor se apaga por problemas con el suministro de energía.

- Tareas modificativas

Las acciones modificativas permiten corregir cualquier defecto de diseño o montaje, calidad de materiales, métodos inadecuados de mantenimiento o cualquier otra falla característica de esta fase (Morrow, 1985, 141).

Las acciones modificativas que se proponen para el sistema de bombeo se determinaron por un lado con el resultado del análisis *FMECA*, y por otro con la

manipulación y revisión frecuente de los equipos, lo que permitió conocer a fondo el funcionamiento de los mismos y los eventos que producían los fallos.

El análisis *FMECA* es una gran ayuda para seleccionar las acciones de mayor importancia para reducir los fallos. La acción modificativa propuesta es la de llevar a cabo la instalación de un suiche-flotador que se conecte al contactor principal del tablero de control y cuya función sea la de apagar las seis bombas en el momento en que el nivel del agua en el tanque esté en el límite para poder hacer la succión y de esta manera evitar que las bombas trabajen en vacío (ver cotización en el Anexo A).

El problema se presenta cuando se realizan las prácticas en el laboratorio de hidráulica debido a que se requiere usar mucha cantidad de agua proveniente del tanque con lo cual se reduce el nivel hasta el punto en que se produce la falla funcional. En el momento en que se realizan las prácticas el nivel del agua baja hasta que las bombas del proyecto son incapaces de realizar la succión y comienzan a trabajar en vacío.

Los modos de falla a los cuales se asocia este suceso son, como el evento lo indica, que el nivel del tanque está por debajo de la succión. Los otros modos de falla que se producen como consecuencia de éste son que la bomba trabaja en vacío, el motor se dispara porque la bomba trabaja en vacío, hay cavitación, y se sobrecalienta el motor.

Con el sistema de suiche-flotador se garantiza que las bombas no trabajen en vacío, a no ser que se produzca una fuga en la tubería o en alguno de los accesorios, con lo cual se eliminan o reducen de manera significativa los modos de falla mencionados anteriormente.

El problema relacionado con el bajo nivel en el tanque también tiene otra solución que consiste en la instalación de unos sensores de nivel en el tanque de tal forma que en el momento en que el nivel del agua llegue al límite en el que las bombas del proyecto puedan hacer la succión, se apaguen las bombas del laboratorio permitiendo así que las otras continúen con su funcionamiento normal (ver cotización en el Anexo B). Esta propuesta de solución no es tan factible ya que esto podría presentar inconvenientes en las prácticas de laboratorio.

Otra acción de mantenimiento que se plantea es la de modificar el funcionamiento del PLC del tablero de control mediante la programación de la función de encendido automático de tal forma que cuando se presenten variaciones de voltaje, si se apagan las bombas, se vuelvan a prender inmediatamente se estabilicen las condiciones de operación y no como sucede normalmente que se quedan apagadas hasta que alguien las prende manualmente.

- Tareas preventivas

Las acciones preventivas permiten disminuir en el sistema el estado de las fallas, que presentan el inconveniente de que cuando el elemento es sustituido o ajustado funcionalmente, se pierde cierta cantidad de vida útil ya que no alcanza el estado de falla. Es importante recordar que el propio nombre de la acción establece su condición, que se pueda prevenir la falla, y sobre todo que se pueda planear.

En el sistema de bombeo las acciones de carácter preventivo son en primera instancia las que se tienen programadas alrededor de cada seis meses, donde se paran todas las bombas, se hace una inspección general de todos los componentes y dependiendo del desgaste se procede a hacer el cambio del elemento. Con los rodamientos del motor se verifica que no tengan ruidos anormales y que el eje gire libremente; el sello mecánico sólo se cambia si hay

fugas por el eje cuando está en funcionamiento la bomba, y se revisa que el anillo en O esté en buen estado o de lo contrario se cambia.

Las tareas preventivas también surgen, por ejemplo, cuando una de las bombas comienza a emitir ruidos extraños, generándose así la necesidad de programar un mantenimiento. Otras tareas preventivas comunes son las de hacer inspecciones con una frecuencia determinada.

- Tareas predictivas

Las acciones predictivas en los sistemas se usan cuando el comportamiento de las fallas empieza a ser predecible. Igualmente cuando la vida útil del elemento se acelera y la tasa de fallas se incrementa apresuradamente con el fin de tipificar el comportamiento futuro de los elementos para conocer su verdadera vida útil en tiempo presente (Knezevic,1996,32).

Los modos de falla del sistema de bombeo se pueden controlar de manera significativa, en algunos casos específicos, mediante tareas predictivas como análisis de vibraciones para los rodamientos del motor, análisis de termografía para el motor y análisis de ultrasonido para detectar fugas en la tubería, entre otros.

Tabla 20. Tareas de mantenimiento para el sistema de bombeo.

Modo de falla eliminado (E) o reducido (R)		Tareas proactivas y correctivas
Código	Descripción	
0-A-3 (E)	No hay agua en el sistema	Acción de mantenimiento modificativo sobre el tanque mediante la instalación de un sistema de suiche-flotador el cual apaga todas las bombas en el momento en que el nivel de agua es el mínimo requerido para hacer la succión.
0-A-6 (E)	Nivel por debajo de la succión	
0-A-7 (R)	La bomba está trabajando en vacío	
0-B-1 (R)	Motor se dispara porque la bomba trabaja en vacío	
0-B-9 (R)	Cavitación	
0-D-1 (R)	Se está sobrecalentando el motor	
3-A-1 (E)	Filtración en el tanque	
0-A-2 (R)	El motor está apagado	Tarea modificativa en el funcionamiento del PLC del tablero de control mediante la programación de la función de encendido automático para que cuando se presenten apagones las bombas se enciendan inmediatamente se normalicen las condiciones de operación.
3-A-2 (R)	Fuga en tubería o accesorios	Tarea preventiva de inspección visual sobre la tubería de PVC, los diferentes accesorios y en el eje entre la bomba y el motor asegurándose que no hayan fugas de agua.
3-A-5 (R)	Sello de la bomba defectuoso	
7-B-4 (R)	Disparo de sobrecarga del motor está malo	Acción preventiva de inspección provocando intencionalmente la detención del motor a través del tablero de control para verificar que está funcionando correctamente.
0-D-2 (R)	Interruptor de paro de emergencia defectuoso	Tarea preventiva de inspección mediante el paro premeditado con el interruptor de paro de emergencia de todas las bombas y cerciorarse que el interruptor se encuentra en óptimas condiciones.
0-A-14 (R)	La granada está obstruida	Acción preventiva de inspección verificando que el agua del tanque no tenga residuos de hojas o basura que puedan afectar posteriormente el funcionamiento de las bombas.
0-C-7 (R)	Cuerpos extraños en el impulsor	
0-D-6 (R)	Obstrucción en la tubería de succión o descarga	
10-A-7 (R)	Suciedad y cuerpos extraños dentro del sistema	
0-C-1 (R)	La bomba ha perdido eficiencia	Tarea preventiva de inspección sobre el programa de control de las bombas para asegurar que el consumo de potencia no esté por encima del rango de funcionamiento normal.
9-A-5 (R)	Las partes rotatorias rozan contra las partes fijas	
9-A-7 (R)	Empuje excesivo ocasionado por una falla mecánica dentro de la bomba	
6-B-3 (R)	La válvula de contraflujo está mala	Acción preventiva de inspección abriendo y cerrando la válvula para confirmar que no presenta un mal funcionamiento.

#### 4.4 RECÁLCULO DEL *RPN*

En este numeral se muestra el recálculo del *RPN* mediante la evaluación de la severidad, la probabilidad de ocurrencia y la posibilidad de detección, para el sistema de bombeo suponiendo que se aplican las tareas proactivas y correctivas.

El análisis que se desarrolla conserva la misma función principal y funciones secundarias, lo único que varía son los modos de falla que se eliminan al realizar las acciones modificativas.

##### 4.4.1 Justificación de los modos de falla eliminados

Los modos de falla que se excluyen son todos aquellos que ya no se presentan debido a las tareas modificativas realizadas, estos modos de falla que se eliminan al desarrollar las acciones modificativas en el sistema de bombeo son resultado del análisis *FMECA*.

La ejecución de la tarea correspondiente al sistema de suiche-flotador para apagar las bombas en el momento en que el nivel de agua está por debajo de la succión elimina todos los modos de falla relacionados con este suceso.

Con la ayuda de este sistema las bombas no volverán a funcionar en vacío, a no ser que se presente una fuga en la tubería o en los accesorios. El modo de falla asociado a que el nivel del agua esté por debajo de la succión ya no tiene relevancia porque de igual forma las bombas se apagan antes de que esto suceda; asimismo, el modo de falla que dice que no hay agua en el sistema se excluye por lo que ahora el nivel del agua en el tanque no es tema de preocupación ya que se tiene previsto que para cierto nivel se apaguen las bombas evitando así que se generen otros modos de falla.

El modo de falla en el cual el motor se apaga por variaciones de voltaje o falta de electricidad, presenta una disminución considerable con la tarea de encendido automático a través del PLC ya que con esta modificación, cuando se presentan estas variaciones, las bombas permanecen con un funcionamiento casi continuo evitando el problema de tener que prenderlas manualmente.

#### 4.4.2 Recálculo del *RPN* con las tareas proactivas realizadas.

La ejecución de todas las actividades programadas o no derivadas del procedimiento *FMECA*, conlleva a realizar nuevamente la evaluación del *RPN* mediante la valoración vigente (después de realizadas las tareas acordadas). De los parámetros de severidad, ocurrencia y detección, se establece en forma reiterativa la jerarquización, la asignación de recursos, la logística y así sucesivamente, hasta algún momento en que se tenga control absoluto de las fallas o se hayan controlado de forma significativa (Mora, 2005, 199).

La metodología de calificación de la severidad, ocurrencia y detección para los modos de falla es la misma utilizada anteriormente.

Tabla 21. Recálculo del RPN.

Código del modo de falla	Descripción del modo de falla	Calificación severidad						RPN			Jerarquización de ejecución de las tareas	
		FO	SF	MA	IC	OR	OC	S	O	D		Valor RPN
0-A-1	La tubería esta obstruida	3	0	0	1	0	0	0.450	2	1	0.9	76
0-A-2	El motor está apagado	0	0	0	1	1	0	0.600	3	1	1.8	49
0-A-4	Impulsor o carcaza de la bomba obstruida	3	0	0	2	1	0	1.050	2	2	4.2	1
0-A-5	La válvula principal está cerrada	2	0	0	0	1	0	0.100	4	1	0.4	87
0-A-7	La bomba está trabajando en vacío	3	0	0	0	1	0	0.450	2	3	2.7	22
0-A-8	Bolsa de aire en el tubo de succión	1	0	0	0	1	0	0.350	2	2	1.4	55
0-A-9	Sentido incorrecto de rotación	1	0	0	0	0	0	0.050	2	1	0.1	103
0-A-10	Falla mecánica	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	6
0-A-11	Velocidad del sistema muy baja	1	0	0	0	0	0	0.050	2	2	0.2	94
0-A-12	Margen insuficiente entre la presión de vapor y la presión de vacío	1	0	0	0	0	0	0.050	2	2	0.2	95
0-A-13	Carga total del sistema mayor que la carga de proyecto de la bomba	1	0	0	1	1	0	0.650	2	2	2.6	24
0-A-14	La granada está obstruida	3	0	0	1	0	0	0.450	1	3	1.4	66
0-A-15	Impulsor dañado	1	0	0	1	1	0	0.650	1	2	1.3	68
0-B-1	El motor se dispara porque la bomba trabaja en vacío	4	0	0	0	1	0	0.500	1	2	1.0	75
0-B-2	Motor desalineado con la bomba	3	0	0	1	1	0	0.750	1	3	2.3	35
0-B-3	Eje torcido del acople	3	0	0	1	1	0	0.750	1	3	2.3	36
0-B-4	Impulsor desbalanceado	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	7
0-B-5	Sentido incorrecto de rotación	1	0	0	0	0	0	0.050	2	1	0.1	104
0-B-6	Impulsor dañado	1	0	0	1	1	0	0.650	1	2	1.3	69
0-B-7	Falla mecánica	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	8
0-B-8	Soltura del eje	3	0	0	0	0	0	0.150	2	2	0.6	85
0-B-9	Cavitación	1	0	0	0	1	0	0.350	1	3	1.1	73
0-B-10	Resonancia entre la bomba y otros elementos del sistema	1	0	0	0	1	0	0.350	2	2	1.4	56
0-B-11	Obstrucción en la tubería de succión o descarga	3	0	0	1	0	0	0.450	2	2	1.8	50
0-B-12	Impulsor o carcaza de la bomba obstruida	3	0	0	2	1	0	1.050	2	2	4.2	2
0-B-13	Eje torcido del motor	3	0	0	1	1	0	0.750	1	3	2.3	37
0-C-1	La bomba ha perdido eficiencia	1	0	0	0	1	0	0.350	1	3	1.1	74
0-C-2	Margen insuficiente entre la presión de vapor y la presión de vacío	1	0	0	0	0	0	0.050	2	2	0.2	96
0-C-3	La tubería esta obstruida	3	0	0	1	0	0	0.450	2	1	0.9	77
0-C-4	Velocidad del sistema muy baja	1	0	0	0	0	0	0.050	2	2	0.2	97
0-C-5	La válvula principal está muy cerrada	2	0	0	0	0	0	0.100	4	2	0.8	79
0-C-6	Carga total del sistema mayor que la carga de proyecto de la bomba	1	0	0	1	1	0	0.650	2	2	2.6	25
0-C-7	Cuerpos extraños en el impulsor	3	0	0	1	1	0	0.750	1	3	2.3	38
0-C-8	El motor está apagado	0	0	0	1	1	0	0.600	4	1	2.4	31
0-C-9	La granada está obstruida	3	0	0	1	0	0	0.450	2	2	1.8	51
0-C-10	Impulsor dañado	1	0	0	1	1	0	0.650	2	2	2.6	26
0-D-1	Se está sobrecalentando el motor	2	0	0	1	1	0	0.700	1	2	1.4	57
0-D-2	Interruptor de paro de emergencia defectuoso	4	1	0	0	1	0	0.700	1	4	2.8	20
0-D-3	Transductor de presión malo	1	0	0	1	1	0	0.650	2	1	1.3	70
0-D-4	Falla mecánica	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	9
0-D-5	Impulsor o carcaza de la bomba obstruida	3	0	0	2	1	0	1.050	2	2	4.2	3
0-D-6	Obstrucción en la tubería de succión o descarga	3	0	0	1	0	0	0.450	1	2	0.9	78
1-A-1	Cantidad excesiva de aire o gas en el líquido	1	0	0	0	1	0	0.350	2	2	1.4	58
1-A-2	Velocidad del sistema muy baja	1	0	0	0	0	0	0.050	2	2	0.2	98
1-A-3	Sentido incorrecto de rotación	1	0	0	0	0	0	0.050	2	1	0.1	105
1-A-4	Carga total del sistema mayor que la carga de proyecto de la bomba	1	0	0	1	1	0	0.650	2	2	2.6	27
1-A-5	La granada está obstruida	3	0	0	1	0	0	0.450	2	2	1.8	52
1-A-6	Impulsor dañado	1	0	0	1	1	0	0.650	2	2	2.6	28
1-B-1	La válvula principal está cerrada	2	0	0	0	0	0	0.100	4	1	0.4	88
1-B-2	La válvula de aforo está cerrada	2	0	0	0	0	0	0.100	4	1	0.4	89
1-B-3	La válvula de contraflujo está cerrada	2	0	0	0	0	0	0.100	4	1	0.4	90
2-A-1	Switch de encendido defectuoso	1	0	0	0	1	0	0.350	2	1	0.7	80
2-A-2	Switch de emergencia activado	1	0	0	0	1	0	0.350	2	1	0.7	81
2-B-1	Switch de encendido defectuoso	1	0	0	0	1	0	0.350	2	3	2.1	44
2-B-2	Switch de emergencia activado	1	0	0	0	1	0	0.350	2	1	0.7	82
3-A-2	Fuga en tubería o accesorios	1	0	0	1	1	0	0.650	1	2	1.3	71
3-A-3	Evaporación excesiva	3	0	0	0	1	0	0.450	2	4	3.6	4
3-A-4	La granada está obstruida	3	0	0	1	0	0	0.450	2	2	1.8	53
3-A-5	El sello de la bomba está defectuoso	2	0	0	0	1	0	0.400	1	3	1.2	72
4-A-1	Interruptor de paro de emergencia defectuoso	4	1	0	0	1	0	0.700	1	4	2.8	21
5-A-1	Falla mecánica	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	10
5-A-2	Caída de voltaje en la línea o bobinado del motor	1	0	0	0	0	0	0.050	2	2	0.2	99
5-A-3	Capacitor débil o en corto circuito	1	0	0	0	1	0	0.350	2	2	1.4	59
5-A-4	Motor desalineado con la bomba	3	0	0	1	1	0	0.750	1	3	2.3	39
5-A-5	Desbalanceo en el rotor	4	0	0	2	1	0	1.100	1	2	2.2	42
5-A-6	Eje torcido del motor	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	11
5-A-7	No hay excitación del campo magnético	1	0	0	0	0	0	0.050	2	2	0.2	100
5-A-8	Acople desalineado	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	12
6-A-1	La válvula principal no funciona correctamente	3	0	0	1	1	0	0.750	1	4	3.0	13
6-A-2	La válvula de contraflujo no funciona correctamente	3	0	0	2	1	0	1.050	1	2	2.1	45
6-A-3	La válvula de aforo no funciona correctamente	3	0	0	2	1	0	1.050	1	2	2.1	46

Código del modo de falla	Descripción del modo de falla	Calificación severidad						RPN				Jerarquización de ejecución de las tareas
		FO	SF	MA	IC	OR	OC	S	O	D	Valor RPN	
6-B-1	La válvula principal está obstruida	3	0	0	0	0	0	0.150	2	2	0.6	86
6-B-2	La válvula de aforo está mala	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	14
6-B-3	La válvula de contraflujo está mala	3	0	0	2	1	0	1.050	1	2	2.1	47
7-A-1	Disparo de sobrecarga	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	15
7-A-2	Falla mecánica	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	16
7-A-3	Falla de potencia	1	0	0	0	0	0	0.050	2	2	0.2	101
7-A-4	Caída de voltaje en la línea o bobinado del motor	1	0	0	0	0	0	0.050	2	2	0.2	102
7-A-5	Capacitor débil o en corto circuito	1	0	0	0	1	0	0.350	2	2	1.4	60
7-B-1	Falla mecánica	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	17
7-B-2	Estatador en corto circuito	1	0	0	0	1	0	0.350	2	2	1.4	61
7-B-3	Fusibles fundidos	1	0	0	1	1	0	0.650	2	2	2.6	29
7-B-4	El disparo de sobrecarga del motor está malo	4	0	0	1	1	0	0.800	1	4	3.2	5
8-A-1	La válvula principal está cerrada	2	0	0	0	0	0	0.100	4	1	0.4	91
8-A-2	La válvula de aforo está cerrada	2	0	0	0	0	0	0.100	4	1	0.4	92
8-A-3	El flujo del tanque está por encima de 70°C	4	1	0	1	1	0	1.000	1	3	3.0	18
8-A-4	La válvula de contraflujo está cerrada	2	0	0	0	0	0	0.100	4	1	0.4	93
9-A-1	La bomba está trabajando en vacío	3	0	0	0	1	0	0.450	2	3	2.7	23
9-A-2	Motor desalineado con la bomba	3	0	0	1	1	0	0.750	1	3	2.3	40
9-A-3	Eje torcido del acople	3	0	0	1	1	0	0.750	2	2	3.0	19
9-A-4	Impulsor dañado	1	0	0	1	1	0	0.650	2	2	2.6	30
9-A-5	Las partes rotatorias rozan contra las partes fijas	1	0	0	0	1	0	0.350	1	2	0.7	83
9-A-6	Rotor desequilibrado	4	0	0	2	1	0	1.100	1	2	2.2	43
9-A-7	Empuje excesivo ocasionado por una falla mecánica dentro de la bomba	3	0	0	1	1	0	0.750	1	3	2.3	41
9-A-8	Rodamientos defectuosos	2	0	0	0	1	0	0.400	2	3	2.4	32
9-A-9	Turbulencias excesivas dentro del sistema	1	0	0	0	1	0	0.350	2	2	1.4	62
9-A-10	Cavitación	1	0	0	0	1	0	0.350	2	3	2.1	48
9-A-11	El sello de la bomba está defectuoso	2	0	0	0	1	0	0.400	2	3	2.4	33
10-A-1	Rodamientos malos	2	0	0	0	1	0	0.400	2	3	2.4	34
10-A-2	Las partes rotatorias rozan contra las partes fijas	1	0	0	0	1	0	0.350	2	2	1.4	63
10-A-3	Aire en el sistema	2	0	0	0	1	0	0.400	2	2	1.6	54
10-A-4	Ventilador roza con el blindaje	1	0	0	0	1	0	0.350	2	2	1.4	64
10-A-5	Turbulencias excesivas dentro del sistema	1	0	0	0	1	0	0.350	2	2	1.4	65
10-A-6	Bomba pegada	1	0	0	0	1	0	0.350	2	1	0.7	84
10-A-7	Suciedad y cuerpos extraños dentro del sistema	3	0	0	1	0	0	0.450	1	3	1.4	67

En la tabla 2 se muestran los resultados del cálculo del *RPN* sin involucrar los modos de falla eliminados e incluyendo los cambios en la calificación de los que se redujeron después de hacer las tareas proactivas sobre el sistema de bombeo. Asimismo, se hizo de nuevo la jerarquización de ejecución de las tareas con lo cual se pretende seleccionar los modos de falla que se deben intervenir mediante nuevas tareas.

Tabla 22. Comparación modos de falla antes y después de tareas mantenimiento.

Código del modo de falla	Descripción del modo de falla	Antes		Después	
		Valor RPN	Jerarquización de ejecución de las tareas	Recálculo RPN	Jerarquización de ejecución de las tareas
0-A-2	El motor está apagado	2.4	41	1.8	49
0-A-3	No hay agua en el sistema	3.6	12	Eliminado	
0-A-6	El nivel del tanque está por debajo de la succión	6.0	2	Eliminado	
0-A-7	La bomba está trabajando en vacío	5.4	4	2.7	22
0-A-14	La granada está obstruida	2.7	31	1.4	66
0-B-1	El motor se dispara porque la bomba trabaja en vacío	2.0	60	1	75
0-B-9	Cavitación	2.1	54	1.1	73
0-C-1	La bomba ha perdido eficiencia	2.1	55	1.1	74
0-C-7	Cuerpos extraños en el impulsor	4.5	6	2.3	38
0-D-1	Se está sobrecalentando el motor	2.8	29	1.4	57
0-D-2	Interruptor de paro de emergencia defectuoso	5.6	3	2.8	20
0-D-6	Obstrucción en la tubería de succión o descarga	1.8	63	0.9	78
3-A-1	Filtración en el tanque	3.2	14	Eliminado	
3-A-2	Fuga en tubería o accesorios	2.6	38	1.3	71
3-A-5	El sello de la bomba está defectuoso	2.4	43	1.2	72
6-B-3	La válvula de contraflujo está mala	4.2	11	2.1	47
7-B-4	El disparo de sobrecarga del motor está malo	6.4	1	3.2	5
9-A-5	Las partes rotatorias rozan contra las partes fijas	1.4	73	0.7	83
9-A-7	Empuje excesivo ocasionado por una falla mecánica dentro de la bomba	4.5	7	2.3	41
10-A-7	Suciedad y cuerpos extraños dentro del sistema	2.7	32	1.4	67

Los modos de falla sobre los cuales se ejecutan las tareas de mantenimiento presentan una variación notable luego de hacer el recálculo del *RPN*.

#### 4.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS CMD

##### 4.5.1 Curva de la bañera tipos de fallas y estrategias

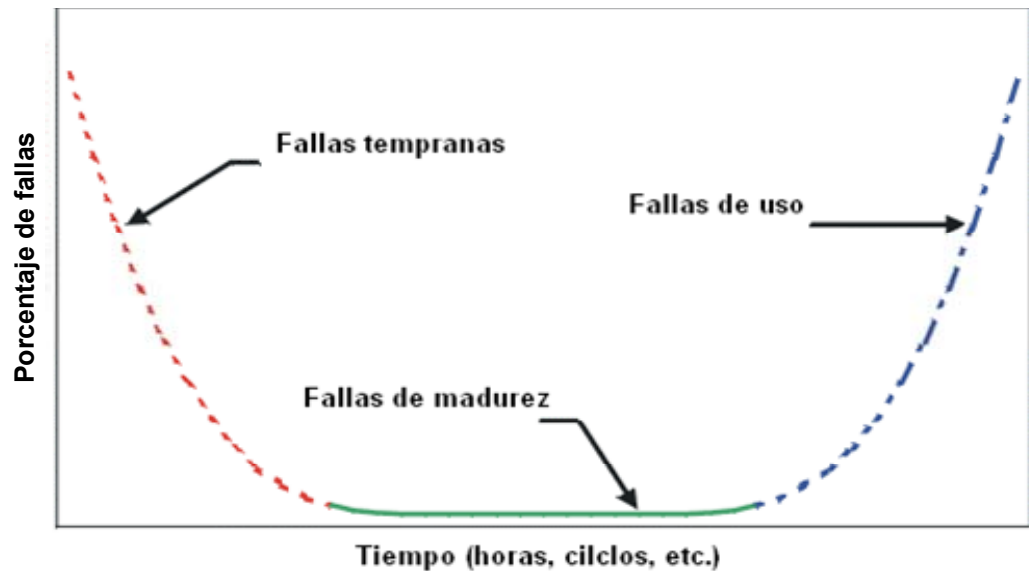
La curva de la bañera o curva de Davies es la forma típica de la función de riesgo o tasa de fallas graficada contra el tiempo de vida de una entidad. Esta curva decrece al comienzo (región I), debido a las fallas tempranas<sup>10</sup> mientras el sistema se depura, es decir, mientras se eliminan los errores; se estabiliza cerca a una constante (región II), a lo largo de su vida útil<sup>11</sup>, durante la cual las fallas ocurren de forma aleatoria y finalmente se incrementa rápidamente (región III), por el desgaste, envejecimiento o fatiga (Ramakumar,1993;59).

<sup>10</sup> También llamadas mortalidad infantil.

<sup>11</sup> También llamada etapa de rodaje.

La confiabilidad distingue tres tipos característicos de fallas (excluyendo daños por manejo inadecuado, almacenamiento u operación inapropiada de los usuarios), que son inherentes al equipo, que ocurren sin ninguna falla por parte del operador y están relacionadas con cada una de las regiones de vida del elemento y el tipo de falla que en ella ocurren. Estas fallas son las tempranas, las aleatorias y las de envejecimiento.

Ilustración 14. Idealización de la curva de bañera con sus principales regiones.



ReliaSoft @, 2006

- Fallas tempranas o mortalidad infantil

Son fallas que ocurren tempranamente en la vida de los equipos. En la mayoría de los casos se deben a una pobre manufactura y a un bajo control de calidad durante los procesos de producción. También se deben a problemas de ensamble o mala conexión que pasan desapercibidos. Tales problemas generan fallas, las cuales tienen lugar durante los primeros minutos u horas de operación, tanto al comienzo mismo como después de una acción de mantenimiento (Bazovsky, 1961,3), (Ramakumar, 1993;59).

El comportamiento de la tasa de fallas en esta fase es decreciente, en la medida que al pasar el tiempo la probabilidad de que ocurra una falla disminuye; las operaciones sugeridas en esta fase son las de tipo correctivo y modificativo, en especial esta última, dado que las fallas que aparecen habitualmente son diferentes. La eliminación de fallas sucesivas recurrentes normalmente se logra mediante la aplicación de la metodología análisis de fallas *FMECA* (Mora,2005,77).

Las fallas tempranas pueden ser inducidas en equipos cada vez que son reparados ya sea por una inapropiada selección de los componentes por reemplazar, por errores durante el ensamble o mal ajuste del sistema. Estas fallas pueden eliminarse mediante métodos de depuración apropiada, estandarización de trabajos y una buena selección de los componentes. Así como las malas prácticas de mantenimiento pueden inducir a la aparición de fallas tempranas, un equipo puede mantenerse en esta zona por sus características técnicas (Bazovsky,1961,5).

- Fallas de madurez o vida útil

La fase de madurez o vida útil se tipifica por fallas enmarcadas en origen técnico, ya sea de procedimientos humanos o de equipos, las acciones que más se adaptan a esta etapa son de las de tipo correctivo, cuando las fallas son esporádicas; en el evento de ser fallas crónicas se actúa con *FMECA* y acciones modificativas (Mora,2005,77).

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

Los componentes con una tasa de falla constante tienen una distribución de los tiempos de falla exponencial, en otras palabras, la probabilidad de falla durante el siguiente segmento de tiempo no cambia a través del tiempo de vida del componente, indicando que es “tan bueno como nuevo” sin importar cuanto tiempo haya operado. En este caso el mantenimiento preventivo es irrelevante, sin embargo, las revisiones periódicas del componente o sistema son muy importantes porque permiten identificar las fallas ocultas y prematuras (Gnedenko y otro,1995,438) (Bazovsky,1961,4).

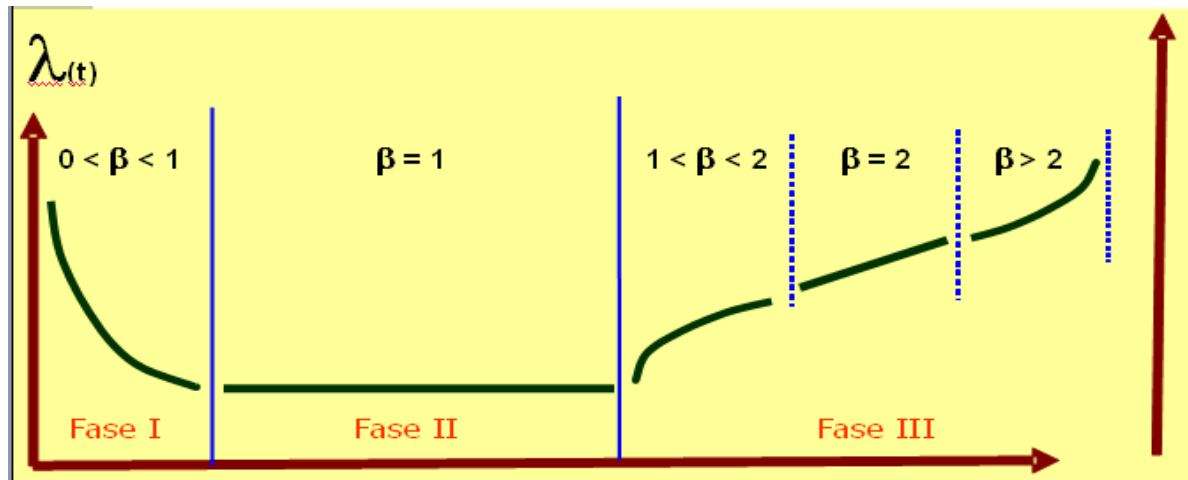
- Fallas de uso o envejecimiento

El tercer tipo de falla que se presenta está causado por el uso normal de las partes. Ocurren en el equipo sólo si éste está correctamente mantenido, las fallas por desgaste son síntoma de un componente envejecido. La edad a la cual el desgaste ocurre varía de acuerdo con el tipo de componente, y fluctúa desde minutos hasta años. En la mayoría de los casos las fallas por desgaste pueden ser prevenidas, una práctica muy común es reemplazar el componente antes de que éste llegue a la vida de desgaste; en otros casos, cuando la parte es inaccesible, es necesario diseñar el componente con una vida mayor a la del sistema (Bazovsky,1961,3) (Ramakumar,1993,59).

Las fallas de desgaste se trabajan a través de las distribuciones, determinando los períodos óptimos apropiados para la realización de reemplazos preventivos o de un *overhaul* (Bazovsky,1961,3).

La curva de Davies que relaciona los tipos de fallas con las estrategias para contrarrestarlas se puede resumir en la siguiente ilustración.

Ilustración 15. Causas de fallas y estrategias mantenimiento en curva de Davies.



CAUSAS DE LAS FALLAS		
Fase 1	Fase 2	Fase 3
Defectos manufactura.	Medio ambiente.	Fatiga.
Grietas. Mal selección.	Exceso de carga.	Corrosión.
Partes defectuosas.	Mala operación.	Fricción.
Mal montaje.	Errores humanos.	Carga cíclica.
Bajo control de calidad.	Acciones fortuitas.	Fallas de elementos.
Contaminación.	Cambios operacionales.	
Mal diseño y acabados.		
Malas reparaciones.		

ESTRATEGIAS Y ACCIONES DE MANTENIMIENTO		
Fase 1	Fase 2	Fase 3
Se mejora con:	Se mantiene con:	Se mejora con:
Pruebas de arranque.	Lubricación y engrase adecuado	Mantenimiento preventivo.
Verificación de diseño.	Vibraciones. Termografía.	Vibraciones. Predictivo.
Pruebas recepción y aceptación.	Condiciones de operación normales.	Reemplazo de partes.
		Terotecnología.

Mora,2005,78.

#### 4.5.2 Estrategia de mantenimiento en función del parámetro beta

Los valores calculados en confiabilidad, tanto para la fase de reparaciones  $MTBM_c$  como para la sección de mantenimientos planeados (preventivos o predictivos)  $MTBM_p$  dan betas cercanos a 1.0, lo cual indica que se encuentran alrededor de la fase de fallas aleatorias o de vida útil.

La tabla expuesta a continuación enuncia las estrategias de mantenimiento a partir de los resultados del parámetro beta que se obtuvieron con el programa Valramor.

Tabla 23. Estrategias de mantenimiento de bombas en función del parámetro beta.

Bomba	Beta	Estrategia
1	1.062	Mantener el beta (mantener estrategias).
2	1.072	
3	0.910	Después de una falla, hacer mayor control y seguimiento sobre el equipo al momento de entregar.
4	0.940	
5	0.812	
6	0.959	

#### 4.5.3 Estrategias de mantenimiento en función de la vida media obtenida

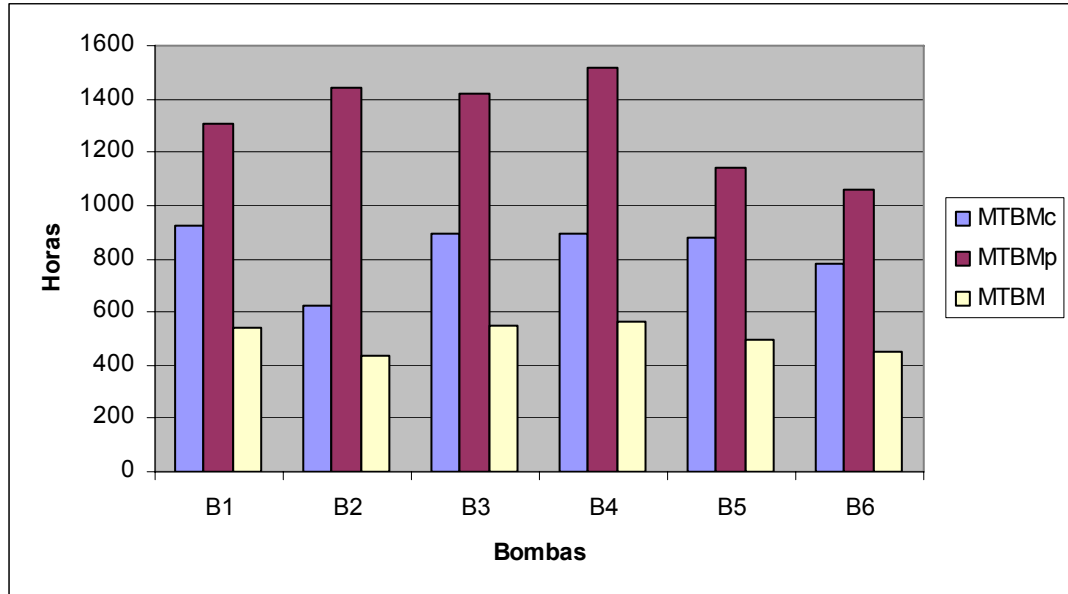
Los resultados obtenidos de los indicadores de confiabilidad proporcionan una idea de las habilidades de cada bomba para desempeñar su función si presentan fallas.

Tabla 24. Indicadores de confiabilidad

	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3	Bomba 4	Bomba 5	Bomba 6
<i>MTBMc</i>	923.81	623.05	891.59	892.82	876.19	784.70
<i>MTBmp</i>	1305.7	1445.77	1419.5	1515.9	1138.1	1061.2
<i>MTBM</i>	541.02	435.41	547.62	561.88	495.06	451.12

De acuerdo con la tabla 24 se observa que las bombas #2 y #6 son las que tienen el menor *MTBMc* lo cual indica que éstas son las que están fallando más seguido. La acción de mantenimiento a seguir va de acuerdo al beta calculado en la distribución de Weibull; como el beta de la bomba #2 está en la fase 3, se mantiene la estrategia y se incrementan los mantenimientos preventivos para aumentar el *MTBMc*. En la bomba #6 que presenta un beta en la fase 1, la estrategia es realizar más pruebas después de una falla, al momento de entregar el equipo.

Gráfica 2. Resultados de confiabilidad del sistema de bombeo.



La gráfica de confiabilidad del sistema de bombeo muestra de una manera más clara los resultados de los indicadores en donde los *MTBM* más bajos corresponden a las bombas #2 y #6. Las estrategias de mantenimiento deben ir enfocadas a incrementar el tiempo medio entre mantenimientos no planeados y de esta forma se incrementa también el *MTBM*.

#### 4.6 PLAN DE MANTENIMIENTO PARA EL SISTEMA DE BOMBEO

El plan de mantenimiento que se muestra en la siguiente tabla se realiza con base en el análisis de fallas *FMECA* en donde se determinan cuáles son los modos de falla más críticos que se deben intervenir, y con base en las mediciones de CMD que establecen los tiempos de operación de las bombas sin que ocurran fallas o mantenimientos planeados y la duración de las intervenciones.

Tabla 25. Plan de mantenimiento para el sistema de bombeo.

Tarea		Frecuencia (días)	Disponibilidad		Mantenibilidad
			Equipo parado		Tiempo (horas)
			Si	No	
Modificativa	Suiche-flotador		X		6
	Funcionamiento PLC			X	2
Preventiva inspección	Tubería PVC	15		X	0.3
	Detención del motor	180	X		0.3
	Parada de emergencia	180	X		0.2
	Agua del tanque	30		X	0.2
	Programa control bombas	8		X	0.1
	Valvula contraflujo	30		X	0.3

#### 4.7 CONCLUSIÓN

Las tareas para eliminar los modos de falla se determinan de acuerdo a un análisis previo en donde se categorizan las fallas y se establecen una serie de actividades con las cuales se pueden reducir o eliminar las mismas.

El recálculo del *RPN* se realiza después de haber ejecutado las acciones de mantenimiento con el fin de ir adquiriendo un control sobre las fallas hasta el punto de erradicarlas totalmente en algunos casos.

El parámetro beta obtenido a partir de las mediciones de CMD permite, con la ayuda de la curva de Davies, establecer las estrategias y acciones de mantenimiento que al aplicarlas en el sistema de bombeo proporcionan una mejora en cuanto al desempeño y la reducción de paradas no planeadas.

## 5 CONCLUSIONES

El procedimiento *FMECA* es una herramienta de gran ayuda para solucionar problemas que se tengan con los equipos, que proporciona una guía para llevar a cabo un mantenimiento acertado sobre los mismos y con un orden de prioridad; es preciso anotar que es sólo una herramienta y que únicamente se pueden obtener buenos resultados si se ejecuta paso a paso y se analizan los datos antes de tomar medidas.

El análisis de fallos y efectos *FMECA* puede arrojar resultados muy valiosos del comportamiento de los equipos y de la forma en que se deben atacar los fallos presentados en los mismos, sin embargo, para que esta técnica presente resultados satisfactorios, es crucial que haya personal calificado que conozca plenamente los equipos y que tenga contacto directo con ellos.

El análisis *FMECA* muestra que los modos de falla más críticos son aquellos que requieren acciones modificativas debido a que tienen defectos de diseño o montaje del sistema. Estos modos de falla se centran en el tanque de almacenamiento de agua y en los apagones de los motores de las bombas.

El *FMECA* permite determinar el riesgo mediante el cálculo del *RPN* asociado a los modos de falla presentados en los equipos, máquinas y procesos industriales; además facilita la priorización de las fallas en términos de su importancia para identificar y realizar acciones correctivas, preventivas, modificativas y predictivas con el fin de proponer tareas y acciones de mantenimiento. En el sistema de bombeo, la aplicación de la metodología *FMECA* permite jerarquizar y atacar las fallas más críticas eliminando o disminuyendo las más ocurrentes mediante la ejecución de tareas modificativas y preventivas que permiten un mejor cumplimiento de las funciones del equipo objeto de estudio.

El modo de falla asociado al nivel de agua en el tanque repercute de manera significativa en el sistema de bombeo generando múltiples modos de falla que en el tiempo pueden causar una falla más grave. Aunque la propuesta de solución de este modo de falla mediante la instalación del suiche-flotador elimina algunos modos de falla, no es la solución óptima ya que de esta forma las bombas permanecen mucho tiempo paradas mientras que el interés del grupo de investigación GEMI es que estén encendidas el mayor tiempo posible.

Los resultados del cálculo del *RPN* son coherentes y presentan un panorama muy acertado en lo que se refiere a evaluar los modos de falla. Sin embargo, el *RPN* no abarca todos los posibles factores que influyen en la jerarquía, o la forma de calificación en algunos casos no es la apropiada. Es por esto que se hace necesario realizar un análisis posterior sobre la prioridad de las fallas con base en la propia experiencia y las condiciones actuales del sistema de bombeo para tomar la decisión más acertada.

La falla correspondiente a que los motores de las bombas están apagados, en relación con los resultados obtenidos del análisis de fallas *FMECA*, indican que no se presenta un alto *RPN* a pesar de que ocurre con mucha frecuencia. Este modo de falla afecta directamente la función primaria del sistema de bombeo por lo cual es más relevante tomar acciones sobre él que sobre otros modos de falla que tienen mayor importancia según el *FMECA*.

La medición del CMD para el sistema de bombeo permite hacer un análisis de la frecuencia con la cual se presentan las fallas para un tiempo determinado, observando las particularidades inherentes de los componentes del sistema asociados a su capacidad de ser recuperados para el servicio, y estableciendo las características que definen la funcionalidad de los equipos.

Los principales indicadores de CMD se obtienen de una manera más precisa a través de cálculos estadísticos mediante el programa Valramor y se derivan a partir de los parámetros de la distribución de Weibull.

Los parámetros que muestran la probabilidad de los equipos para seguir funcionando bajo el estado normal de operación, y su relación con los mantenimientos planeados y no planeados que se les hacen, se establecen a partir de los indicadores de confiabilidad y mantenibilidad.

Las gráficas obtenidas del programa Valramor permiten interpretar el comportamiento de cada una de las bombas en relación a los tiempos entre mantenimientos planeados y no planeados, y la duración de dichos mantenimientos. En términos generales, se deduce que la bomba #1 es la que tiene un mayor tiempo útil de funcionamiento correcto sin fallas, las tareas de mantenimiento correctivo se terminan más rápidamente en la bomba #6 que en las demás bombas, la bomba #4 es la que más tiempo ha estado en funcionamiento, y las tareas de mantenimiento preventivo se ejecutan más rápidamente en la bomba #5 que en las demás bombas.

Los resultados obtenidos de las disponibilidades inherente y alcanzada son muy parecidos porque están basadas en un entorno ideal, pero en la disponibilidad operacional que se desarrolla en un entorno real se observa la gran influencia que tienen las demoras logísticas y administrativas.

Las acciones de mantenimiento pueden ser reorientadas a partir del estudio de los indicadores generados, incrementando o reduciendo las tareas de mantenimiento preventivo, basándose en las estrategias en función del parámetro beta representadas en la curva de Davies.

El propósito del plan de mantenimiento desarrollado para el sistema de bombeo es evitar que las fallas y sus consecuencias aumenten. Para hacer esto se proponen inspecciones y tareas modificativas cuyo fin es que los seis sistemas de bombeo puedan operar de manera normal y sin interrupciones el mayor tiempo posible.

Las tareas de mantenimiento definidas para el sistema de bombeo son establecidas para intervenir las principales fallas encontradas en el análisis *FMECA* con el fin de reducirlas o eliminarlas, teniendo en cuenta además, las condiciones específicas del sistema de bombeo

## 6 RECOMENDACIONES

Continuar con la ejecución del análisis de fallas *FMECA* para seguir con el proceso de mejoramiento del sistema de bombeo y de esta forma optimizar el control sobre los problemas que alteran el funcionamiento de los equipos.

Implementar el método de Análisis de la Causa Raíz de las Fallas (*RCFA*<sup>12</sup>) como ayuda complementaria al método de análisis de fallas *FMECA* para perfeccionar las etapas requeridas en él, encontrando las diferentes causas inmediatas, básicas y raíz.

Se recomienda que el tanque de agua con el cual interactúan las bombas sea independiente del tanque del laboratorio de hidráulica evitándose todos los problemas que ello acarrea, además que con este nuevo tanque las bombas pueden permanecer encendidas mucho más tiempo. Esto puede ser de gran provecho para el grupo de investigación GEMI.


Se recomienda que para la toma de datos, mediante las cuales se realizan las mediciones de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, se tenga un formato previamente establecido para registrar ordenadamente los días, horas, descripción, etc. de cada una de las intervenciones de mantenimiento planeado o no planeado. Todo esto puede brindar una gran ayuda en el procesamiento de los datos y evitar posibles errores o confusiones.

---





<sup>12</sup> *RCFA root cause failure analysis*

## ANEXOS

### Anexo A. Cotización suiche de nivel tipo flotador.

<b>Empresa:</b> <u>UNIVERSIDAD EAFIT</u>		<b>FECHA</b> <b>Fecha:</b> 29. Sep 06			
<b>Señor (a):</b> Esteban Gutierrez		<b>COTIZACION</b>			
<b>Depto.:</b> Proyectos		<b>Cotizacion N°</b> 929			
<b>Fax:</b> egutier1@eafit.edu.co					
<b>Ciudad:</b> Medellin					
Agradecemos su invitación a cotizar los siguientes equipos:		NIT 800.224.082-8			
<b>ASUNTO</b> Suiche		Somos Autorretenedores			
<b>Ítem</b>		<b>Tiempo Entrega</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>Valor Total</b>
1	Suiche de nivel tipo flotador marca Comus ref B0031	Inmed	1	150,000	150,000
			0	0	0
<b>FORMA DE PAGO :</b>				<b>SUBTOTAL</b>	150,000
<b>I.V.A. (El vigente F.F.):</b>				<b>I.V.A. (16%)</b>	24,000
<b>VALIDEZ OFERTA:</b>				<b>TOTAL</b>	174,000
<b>GARANTIA EQUIPOS:</b>					
<b>CONDICIONES:</b>		<b>Atentamente,</b>		<b>Atentamente,</b>	
1 Los precios de los productos no incluyen la instalación				  <b>SANTIAGO VILLADA</b> Dpto. Ingeniería	
2 Los tiempos de entrega inferiores a 3 días, están sujetos a previa venta					
3 Ver catálogos adjuntos para mayores especificaciones técnicas					
<b>DESCUENTOS:</b>		<b>Contado</b>			
		<b>30 días</b>			

Anexo B. Cotización sensor de nivel.

 <b>HIDROMECA LTDA.</b>  SISTEMAS HIDRÁULICOS Y NEUMÁTICOS INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL CALLE 21 N° 65 B 22 COMB. 318 15 17 - A.A. 05437 Medellín - Fax: 318-02-99 e-mail: jvillegas@hwmec.com - www.hidromeca.com		<b>CERTIFICADO</b>  ISO 9001:2000 REGISTRO: IC&T 23-0204	NIT. 900.090.759 - 1 - IVA - RÉGIMEN COMÚN <b>COTIZACION</b> <b>17563</b>		
PARA: <b>UNIVERSIDAD EAFIT.</b>		CIUDAD Y FECHA: <b>MEDELLÍN, SEPTIEMBRE 12 DE 2006</b>			
TELEFONO: <b>2619349</b> TELFAX: <b>2619381</b> E-MAIL: <b>egutierrez@eafit.edu.co</b>		SOLICITADA POR: <b>ING. ESTEBAN GUTIERREZ L.</b> VALIDA HASTA: <b>20 DÍAS.</b>			
<b>TENEMOS EL AGRADO DE COTIZARLES EN LAS SIGUIENTES CONDICIONES</b>					
PRECIOS C.I.F. <input type="checkbox"/> F.A.S. <input type="checkbox"/> F.O.B. <input type="checkbox"/>		FECHA DE EMBARQUE VIA			
EMPAQUE		FECHA DE ENTREGA <b>4 DÍAS</b>			
VENDEDOR <b>ING. JUAN ALONSO VILLEGAS C</b>		FORMA DE PAGO <b>30 DÍAS.</b>			
ARTICULOS		UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	VALOR
SISTEMA PARA SENSOR NIVEL MÍNIMO Y MÁXIMO, EN TANQUE PARA ALMACENAMIENTO DE AGUA, CON 2 mts DE ALTURA, QUE COMPRENDE:  * SUICHE DE NIVEL EN ACERO INOX, TIPO FLOTADOR, (NIVEL MÍNIMO Y NIVEL MÁXIMO AJUSTABLES EN FORMA INDEPENDIENTE). SUICHE ELÉCTRICO, TIPO REED SWITCH. * TUBO EJE EN ACERO INOX, COMO GUÍA DE FLOTADORES, LONGITUD TOTAL DE 2 mts. ROSCA DE CONEXIÓN DE PROCESO DE 3" NPT. * CABEZAL DE CONEXIÓN ELÉCTRICA, EN ALUMINIO CON TERMINAL CERÁMICO, PROTECCIÓN IP 67.					
<b>TOTAL:</b>		UND	1		\$ 708.334
OBSERVACIONES: <b>MÁS IVA.</b>			ATENTAMENTE		
			<b>SIEMENS</b>		

## BIBLIOGRAFIA

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS TOMADAS DE LIBROS

BARRINGER H. Paul. Availability, Reliability, Maintainability, and Capability. P.E. Barringer & Associates, Inc. Humble, TX. 1996.

BAZOVSKY, Igor. Reliability theory and practice. Prentice-Hall. New Jersey. USA. 1961. ISBN: 0486438678.

BILLINTON, Roy y ALLAN, Ronald. Reliability Evaluation of Engineering Systems. London, GB: Pitman Advanced Publishing Program. 1993.

BLANCHARD, Benjamin S.; VERMA, Dinesh y PETERSON, Elmer L. Maintainability: A Key to Effective Serviceability and Maintenance Management. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc. 1995.

DUFFUAA, S.O. Ben-Daya, S. Maintenance and quality: the mission link.. Journal of Quality in Maintenance Engineering. Volumen 1 Número 1. 1996. West Yorkshire. England. ISSN: 1355-2511.

EBELING, Charles. An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering. Ney York, NY, USA: McGraw-Hill, 1997.

GNEDENKO, Boris y USHAKOV, Igor. Probabilistic Reliability Engineering. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc. 1995.

HARRIS, Gray W. Living with Murphy's law. Research-Technology Management, Vol.37,Iss.1 10-13. USA. 1994.

HENAO. Jhon Harvy. Mora Gutierrez, Luis Alberto (Director). Modos de fallas y análisis de efectos (FMEA) aplicado al sistema de bombeo GEMI. Monografía de Postgrado en Mantenimiento Industrial. Universidad EAFIT. Colombia. 2005.

HIGGINS, Lindley R., Maintenance engineering handbook, fourth edition, Editorial Mc Graw Hill Book Company, 1988. ISBN: 0-07-028766-X

KNEZEVIC, Jezdimir. Mantenimiento. Primera edición. ISDEFE. Madrid, España. 1996. ISBN: 84-89338-08-6

LEEMIS, Lawrence M. Reliability: Probabilistic Models and Statistical Methods. New Jersey, NJ, USA: Prentice-Hall, 1995.

MCNAUGHTON, Kenneth J. Bombas. McGraw – Hill. México, 1992. Pág. 122-128. ISBN: 9684220367.

McCLAVE, James T. & Scheaffer, Richard L. Probabilidad y Estadística Para Ingenieros. Mexico: Editorial Iberoamerica, 1993.

MORA, Luis Alberto. Mantenimiento estratégico para empresas de servicios y/o procesos industriales, Medellín. Colombia. 2005

MORA, Luis Alberto y Otros. Proyecto de Investigación: Diseño para la medición de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD) de equipos en mantenimiento industrial. Medellín Colombia. 2005.

MORENO, Adonai y GALLARDO Yolanda. Serie Aprender a Investigar. Análisis de la Información. 3 ed. Santa Fe de Bogotá, Colombia: Arfo Editores, 1999.

MORROW L. C., Manual del mantenimiento industrial. Tomo II. Editorial Mc Graw Hill. Calz. De Italpán No. 4620, México. 1985.

NACHLAS, Joel. Fiabilidad. Madrid, España: Isdefe, 1995.

PEIRÓ V., José, Organización del mantenimiento preventivo. Editorial Distresa, 2º Edición, Zaragoza, España. 1982. ISBN: 84-7087-162-5

RAMAKUMAR, Ramachandra. Engineering Reliability. Fundamentals and Applications. New Jersey, NJ, USA: Prentice-Hall, 1993.

STAMATIS, D.H. Failure, Mode and Effect Analysis. FMEA from Theory to Execution. ASQC American Society for Quality. Quality Press Edit. Wisconsin. USA. September 1995. ISBN: 0-87389-300-X

VALLEJO, Juan Santiago. Fundamentos y medición de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad. Memorias diplomado en técnicas modernas de mantenimiento haceb. Centro de educación continua. EAFIT. 2006.

VELÁSQUEZ, Diego José y KAMEL, Snaider Yasin. Monitoreo de la condición de las máquinas. Medellín, 2002. Proyecto de grado (ingeniero mecánico). Universidad EAFIT. Departamento de Ingeniería Mecánica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS TOMADAS DE INTERNET

AMEF@,2006

Análisis de modos de fallas y efectos. [en línea] [Citado el 10 de Marzo de 2006] disponible en <http://www.monografias.com>

Método AMFE@,2006

Número prioritario de riesgo. [en línea] [Citado el 18 de Marzo de 2006] disponible en <http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/>

ReliaSoft@,2006

ReliaSoft. System Reliability On-Line Referente. [en línea] [Citado el 15 de Septiembre de 2006] disponible en <http://www.weibull.com/systemrel/>