

**ANALISIS DE CONFIABILIDAD EN LOS EQUIPOS DE BOMBEO DE  
AGUAS RESIDUALES**

**JOSE LUIS ARZUAGA SALAZAR  
LUIS FELIPE GUTIERREZ CASTILLO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO  
BUCARAMANGA  
2004**

**ANALISIS DE CONFIABILIDAD EN LOS EQUIPOS DE BOMBEO DE  
AGUAS RESIDUALES**

**JOSE LUIS ARZUAGA SALAZAR  
LUIS FELIPE GUTIERREZ CASTILLO**

**Monografía de grado presentada como requisito para optar el título de  
Especialista en Gerencia de Mantenimiento.**

**DIRECTOR: ING. ABRAHAM CURE  
INGENIERO CIVIL  
ESPECIALISTA EN GERENCIA DE PROYECTOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO  
BUCARAMANGA  
2004**

Nota de aceptación

---

---

---

---

Presidente del Jurado:  
CARLOS RAMON GONZALEZ BOHORQUEZ

---

Jurado:  
ISNARDO GONZALEZ JAIMES

---

Jurado:  
CARLOS RAMON GONZALEZ BOHORQUEZ

CARTAGENA, ABRIL 2 de 2004

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Profesor **CARLOS RAMON GONZALEZ:**

Por su dedicación, orientación y compromiso con los estudiantes de esta especialización.

A l Ingeniero **ABRAHAM CURE:**

Director del proyecto quien contribuyó a su realización.

A nuestros Padres, Esposas e Hijas Y todas las personas que nos apoyaron en la realización de esta especialización.

## CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCION	1
1. DESCRIPCION DEL SISTEMA	3
1.1 COLECTORES	5
1.2 ESTACIONES DE BOMBEO Y TUBERIAS DE IMPULSION	6
1.3 ESTACION NORTE	7
2. ESTACIONES DE BOMBEO	9
2.1 CARACTERISTICAS GENERALES DE LAS ESTACIONES DE BOMBEO DE AGUA	9
2.2 BOMBAS PARA AGUAS RESIDUALES	9
2.3 BOMBAS SUMERGIBLES	11
2.4 ANALISIS DE LOS SISTEMAS DE BOMBEO	14
2.4.1 Funcionamiento en Paralelo	15
2.4.2 Funcionamiento en Serie	17
2.5 TRATAMIENTO PRIMARIO DE AGUAS RESIDUALES	17
2.5.1 Rejillas	17
2.5.2 Desarenadores	21
2.5.3 Filtros Percoladores	23
2.5.4 Cámara de Aspiración	23
2.6 CONDICIONES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	25
3. MEDIDAS DE CONFIABILIDAD	28

3.1	FUNCION DE CONFIABILIDAD	28
3.2	TASA DE FALLA	31
3.3	CURVA DE LA BAÑERA	32
3.3.1	Mortalidad Infantil	32
3.3.2	Vida Util	33
3.3.3	Desgaste	33
3.4	TIEMPO MEDIO ENTRE FALLAS	34
3.5	DISTRIBUCION EXPONENCIAL	34
3.5.1	Función de Confiabilidad	35
3.5.2	Función de Densidad de Probabilidad de Fallas	36
3.5.3	Función de Tasa de Falla	36
3.6	DISTRIBUCION WEIBULL	37
3.6.1	Función de Confiabilidad	38
3.6.2	Función de Densidad de Probabilidad de Fallas	39
3.6.3	Función de Tasa de Falla	40
4.	MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD	41
4.1	PROCESO DEL RCM	42
4.1.1	Funciones y estándares de Funcionamiento	42
4.1.2	Fallas Funcionales	42
4.1.3	Modos de Fallas(Causas de Falla)	43
4.1.4	Efectos de las Fallas	43
4.1.5	Consecuencias de las Fallas	43
4.2	DESARROLLO DE LOS CONCEPTOS DE: CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y DISPONIBILIDAD	44

4.2.1	Concepto de Confiabilidad	44
4.2.2	Concepto de Probabilidad	44
4.2.3	Concepto de Mantenibilidad	46
4.2.4	Concepto de Disponibilidad	46
4.3	DIAGRAMA DE BLOQUES DE CONFIABILIDAD	47
4.3.1	Diagrama de Bloques en Serie	48
4.3.2	Diagrama de Bloques en Paralelo	48
4.4	DESARROLLO DE INDICADORES DE CONFIABILIDAD	49
4.4.1	Tiempo Medio entre Fallas	50
4.4.2	Tiempo promedio para Reparar	50
4.4.3	Disponibilidad	51
4.4.4	Confiabilidad	51
5.	ANALISIS DE CONFIABILIDAD	52
5.1	CALCULO DE INDICADORES DE MANTENIMIENTO	52
5.2	CONFIABILIDAD DE LA OPERACIÓN DE LA ESTACION DE BOMBEO NORTE	63
5.2.1	Análisis del Diseño Actual Mediante Simulación Hidráulica con el Software Epanet 2.0	68
5.3	APLICACION DEL RCM	72
5.3.1	Función – Falla Funcional	74
5.3.2	Falla Funcional - Modelo de Falla – Efectos de la Falla	75
5.3.3	Análisis de Riesgo	77
5.3.4	Selección de Tareas	78
5.4	ANALISIS DE COSTOS	83
5.5	CAPACITACION DEL PERSONAL	91
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
	BIBLIOGRAFIA	98
	ANEXOS	

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de las Estaciones de Bombeo	4
Figura 2. Sistema de Alcantarillado	5
Figura 3. Esquema Estación Norte	8
Figura 4. Estación Norte	8
Figura 5. Estación de Bombeo Sumergible	10
Figura 6. Bomba Vertical de Flujo Radial	11
Figura 7. Instalación Típica de Bombas de Aguas Residuales	12
Figura 8. Bomba Sumergible con Carril o Guía	13
Figura 9. Bombas en Serie y Paralelo	16
Figura 10. Rejilla Inclinada de Limpieza Manual	19
Figura 11. Cámara de Rejillas	20
Figura 12. Desarenadores	22
Figura 13. Filtro Percolador	24
Figura 14. Función de Confiabilidad	29
Figura 15. Función de Distribución de Fallas Acumuladas	29
Figura 16. Función de Densidad de Probabilidad de Fallas	30
Figura 17. Curva de la Bañera	32
Figura 18. Función de Confiabilidad para la Distribución Exponencial	35
Figura 19. Función de Densidad de Probabilidad de Fallas para la Distribución Exponencial	36
Figura 20. Función de Tasa de Falla para la Distribución Exponencial	36
Figura 21. Función de Confiabilidad para la Distribución de Weibull	39
Figura 22. Función de Densidad de Probabilidad de Fallas para la Distribución Weibull	39
Figura 23. Función de Tasa de Fallas para la Distribución Weibull	40
Figura 24. Diagrama en Serie	48
Figura 25. Diagrama en Paralelo	49
Figura 26. Simulación del Software Epanet 2.0	69
Figura 27. Simulación del Software Epanet 2.0 Trabajando 5 Bombas	70
Figura 28. Costo de Mantenimiento Correctivo	84
Figura 29. Comparación de Costos Actuales con Costos RCM	89
Figura 30. Comparación Costos Actuales con Costos RCM en Barra	90



## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características de las Estaciones de Bombeo	6
Tabla 2. Características de las Impulsiones	6
Tabla 3. Parámetro de forma de Weibull Asociado a la Curva de la Bañera	38
Tabla 4. Parámetro de Forma Weibull	38
Tabla 5. Tasa de Falla de la Estación Norte por Bombas	52
Tabla 6. Tasa de Reparación de la Estación Norte por Bombas	54
Tabla 7. Indicadores por Bombas	56
Tabla 8. Confiabilidad por Bombas a (t) días	58
Tabla 9. Confiabilidad a Diferentes Niveles del Tanque	58
Tabla 10. Tiempo de Fallas por Componentes	59
Tabla 11. Indicadores por Componentes	61
Tabla 12. Confiabilidad por Componentes a (t) días	62
Tabla 13. Análisis FMCA y Comparación entre Tareas Previas y Actuales	79
Tabla 14. Análisis de las Tareas Desarrolladas Actualmente Según Plan de Mantenimiento Anual por Cada Bomba	81
Tabla 15. Tareas de RCM Propuestas por el Modelo Gerencial	82
Tabla 16. Análisis de Costos de Mantenimiento Correctivo durante los Años 2002/2003 de los Equipos de Bombeo	83
Tabla 17. Análisis de Costos por Overhaul Durante los Años 2002/2003 en los Equipos de Bombeo	85
Tabla 18. Análisis de Costos de las Rutinas de Mantenimiento Preventivo Actuales Durante los años 2002/2003 por Cada uno de los Equipos de Bombeo	86
Tabla 19. Análisis de los Costos Totales de Mantenimiento Durante los Años 2002/2003 en los Equipos de Bombeo	87
Tabla 20. Análisis de los Costo Totales Según las Estrategias Propuestas	88
Tabla 21. Costos de Mantenimiento Correctivo y Preventivo	88

## RESUMEN

**TITULO:** Análisis de confiabilidad en los equipos de bombeo de aguas residuales<sup>1</sup>.

**AUTORES:** JOSE LUIS ARZUAGA SALAZAR  
LUIS FELIPE GUTIERREZ CASTILLO<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVES:** Análisis, confiabilidad, equipos de bombeo, operación RCM.

**DESCRIPCIÓN O CONTENIDO:** Los equipos de bombeo de aguas residuales deben funcionar con una confiabilidad cercana al 98% para que se puedan evacuar los afluentes de las estaciones y no se produzcan daños ambientales por vertimientos.

El objetivo general de la monografía es realizar un análisis de confiabilidad en los equipos de bombeo de aguas residuales, centrandolo en la estación norte donde son descargadas todas las aguas residuales y enviadas al emisario submarino en la ciudad de Santa Marta.

Equipos con alta tasa de fallas, altos costos de mantenimiento y baja confiabilidad requiere un estudio basado en confiabilidad donde se pretenda buscar la manera de operar los equipos en su punto óptimo.

El análisis comienza con el estudio de la tasa de fallas y la probabilidad de falla, siguiendo con los modos y causas de fallas y la manera de corregirlos. El análisis de la operación indica los arreglos recomendados para cada caso y los estudios de costos más favorable aplicando RCM.

La confiabilidad desde el punto de vista matemático y probabilístico, es una herramienta poderosa para los planes de mantenimiento que permite complementar el historial de fallas y reparaciones, además, sirve como base para orientar las actividades de mantenimiento.

La capacitación del personal debe tener una orientación en la función del sistema, no en la mentalidad de reparar los equipos.

---

<sup>1</sup> Monografía

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento.  
Director: ABRAHAM CURE Ingeniero Civil.

## SUMMARY

**TITLE:** Analysis of dependability in the teams of pumping of residual waters<sup>3</sup>.

**AUTORES:** JOSE LUIS ARZUAGA SALAZAR  
LUIS FELIPE GUTIERREZ CASTILLO<sup>4</sup>

**KEY WORDS:** Analysis, dependability, teams of pumping, operation RCM.

**DESCRIPCIÓN OR CONTENT:** The teams of pumping of residual waters should work with a near dependability to 98% so that the tributaries of the stations can be evacuated and don't take place environmental damages for effusion.

The general objective of the monograph is to carry out an analysis of dependability in the teams of pumping of residual waters, centering the study in the north station where all the residual waters are discharged and they are sent the submarine emissary in Santa Marta's city.

Teams with high rate of flaws, high maintenance costs and low dependability requires a study based on dependability where it is sought to look for the way to operate the teams in its good point.

The analysis begins with the study of the rate of flaws and the flaw probability, continuing with the ways and causes of flaws and the way of correcting them. The analysis of the operation indicates the arrangements recommended for each case and the most favorable studies of costs applying RCM.

The dependability from the mathematical point of view and probability, is a powerful tool for the maintenance plans that it allows to supplement the record of flaws and repairs, besides, it serves like base to guide the maintenance activities.

The personnel's training should have an orientation in the function of the system, not in the mentality of repairing the teams.

---

<sup>3</sup> Monograph

<sup>4</sup> Faculty of Engineering Physical-Mechanics. Specialization in maintenance management. Director: ABRAHAM CURE Civil Engineer.

## **INTRODUCCION**

Dada la importancia de la evacuación de las aguas residuales en sistemas de alcantarillado, garantizar el funcionamiento de los equipos de bombeo y analizar la estación como un sistema nace la idea de realizar un estudio o análisis de confiabilidad de los equipos de bombeo de aguas residuales de la ciudad de santa marta en la empresa Metroagua s.a, tomando como base de estudio la estación Norte donde se descargan todas las aguas residuales y se envían hacia el emisario submarino .

La justificación se basa en la alta tasa de fallas, altos costos de mantenimiento, baja confiabilidad de los equipos, mantenimiento en base a experiencia, personal centrado en equipos y no en la función del sistema y los posibles daños ambientales que se causan cuando se producen vertimientos por el fallo de la estación de bombeo.

En el capítulo dos se hace una descripción del sistema de alcantarillado y distribución de las aguas residuales en la ciudad de santa marta.

En el tres se analizan las estaciones de bombeo de aguas residuales, sus características, componentes y condiciones de operación.

En el cuatro se desarrolla el tema de la confiabilidad desde el punto de vista matemático y probabilístico.

En el cinco se desarrolla el tema del mantenimiento centrado en confiabilidad donde se explica el proceso de RCM, los conceptos de confiabilidad, mantenibilidad, y disponibilidad. Se analizan los sistemas serie y paralelo.

En el seis se hace todo el análisis de confiabilidad empezando por el cálculo de los indicadores de mantenimiento que nos muestran como esta nuestro sistema, obteniéndose la confiabilidad de la operación con el sistema actual y propuesto. Se analizan los puntos de operación, se desarrolla el FMECA, el RCM aplicado, luego se evalúan los costos del sistema actual y el propuesto con RCM, además de otros. Terminando con una orientación en la capacitación del personal para involucrarlo dentro del estudio de confiabilidad.

Por ultimo se dan unas conclusiones y recomendaciones para que el análisis de confiabilidad sirva de apoyo en la toma de decisiones orientadas a la mejora del sistema.

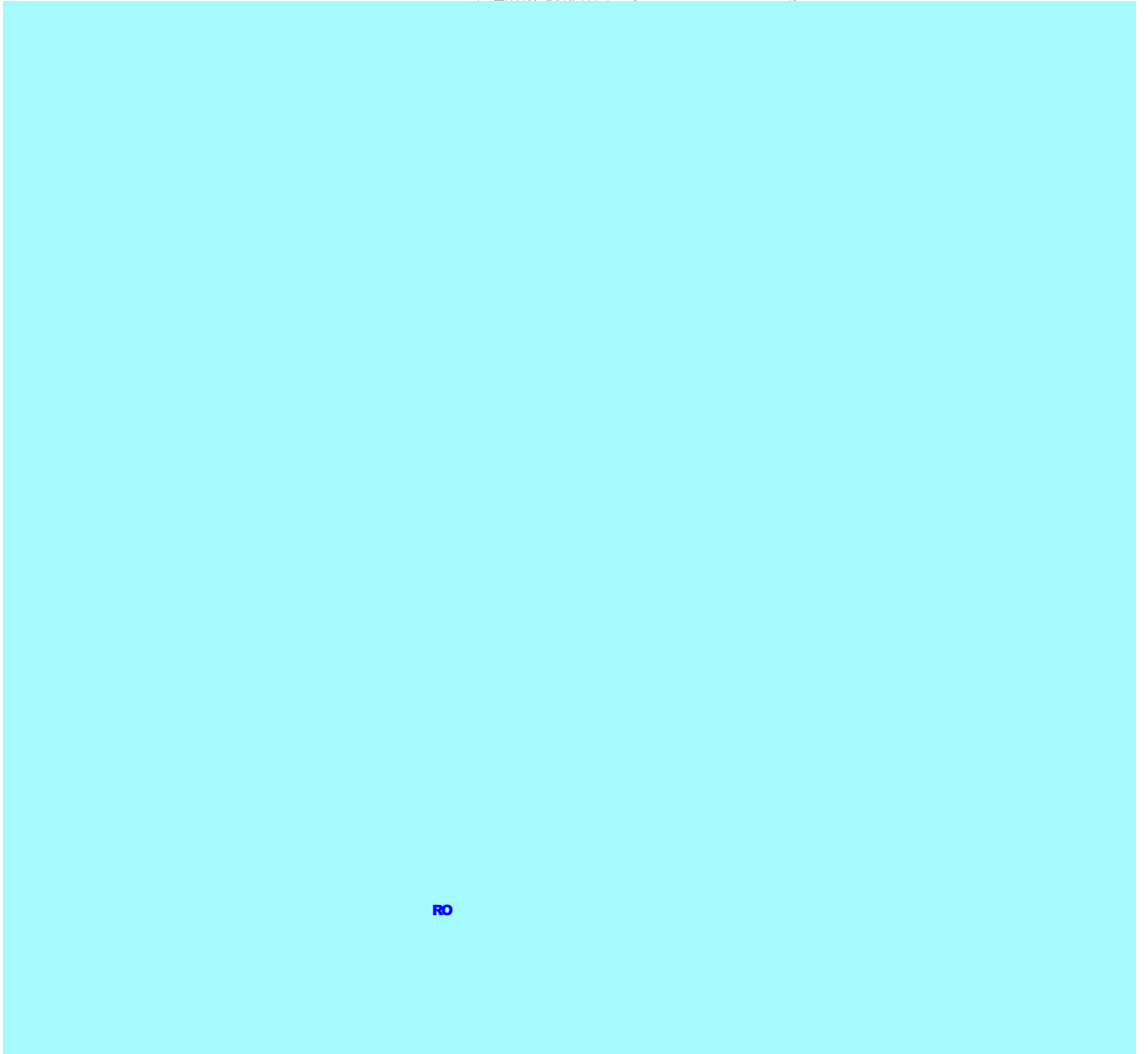
## **1. DESCRIPCION DEL SISTEMA**

La geomorfología de Santa Marta se refleja en la distribución de las aguas negras. Así pues, el sistema que conforman el Rodadero, Gaira y Salguero consiste en la recolección y conducción de las aguas negras utilizando estaciones elevadoras (tres en El Rodadero), siendo la última de ellas la que recoge las aguas servidas de la zona sur y las impulsa hasta un punto, a partir del cual el agua se conduce por gravedad hasta la Estación Norte. A esta misma estación también son conducidas las aguas provenientes de la ciudad de Santa Marta.

En la ciudad han sido dispuestas cuatro estaciones elevadoras importantes en los puntos con cota insuficiente para conducir las aguas por gravedad. Dichas estaciones de bombeo conducen las aguas servidas hasta la Estación Norte, desde donde se impulsan hasta descargarlas al mar, en una zona ubicada al nor-oeste de Santa Marta, denominada El Boquerón.

El sistema de recolección y disposición funciona de manera separativa, es decir, las aguas pluviales se deberían manejar independientemente de las aguas negras pero actualmente existe un remanente de combinación entre estas aguas.

**Figura. 1 Esquema de las estaciones de bombeo**



## **1.1 COLECTORES**

El Sistema de Alcantarillado Sanitario de la ciudad de Santa Marta, contempla una serie de Colectores principales (interceptores) a los cuales llegan otra serie de Colectores secundarios que son los encargados del drenaje de las aguas servidas de grandes áreas, que incluyen los diferentes barrios de la ciudad.

Actualmente se cuenta con cinco colectores que tienen diámetros que varían desde 250 mm hasta 900 mm que es el conducto de mayor diámetro en el sistema.

### **Figura. 2 Sistema de alcantarillado**



## 1.2 SISTEMA DE BOMBEO Y TUBERIAS DE IMPULSION

En la ciudad, el sistema de bombeo está conformado por tres grandes estaciones de aguas negras, que son:

1. Estación de Bombeo del Rodadero ubicada en la avenida Tamacá con calle 20.
2. Estación de Bombeo de Manzanares, ubicada al final de la calle 30 con carrera segunda al Sur del Río Manzanares en el barrio del mismo nombre.
3. Estación de Bombeo Norte, ubicada al final de la carrera primera, frente a las Instalaciones de la Sociedad Portuaria.

Las características de estas estaciones de bombeo se reflejan en la siguiente tabla.

**Tabla. 1 Características de las Estaciones de Bombeo**

<b>Estación</b>	<b>Cantidad bombas</b>	<b>Q (L/s)</b>
Norte	5	3 de 300 y 2 de 600
Manzanares	2	250
Rodadero	3	150

Cada estación de bombeo tiene líneas de impulsión asociadas a ellas las cuales se describen en la siguiente tabla.

**Tabla. 2 Características de las Impulsiones**

<b>Tubería de impulsión</b>	<b>L (m)</b>	<b>D (mm)</b>	<b>Material</b>
E. Norte	740	400 (2) y 600	A. Cemento
E. Manzanares	2100	600	A. Cemento
E. Rodadero	11 200	500	A. Cemento

Adicionalmente, en la ciudad existen otras estaciones de bombeo pero mucho más pequeñas y de menor influencia en el funcionamiento del sistema, como son; 2 reelevadoras en El Rodadero, la estaciones Chimila, El Bosque - Alejandrina y San Pablo, las cuales tienen como función elevar las aguas negras de aquellos barrios o sectores de los mismos que de acuerdo con la topografía no pueden conectarse directamente por gravedad a la red existente.

### **1.3 ESTACION NORTE**

A esta estación llegan todas las aguas negras provenientes del Sistema Sur (Rodadero, Gaira, Salguero) y Sistema de Santa Marta. Consta de un grupo de 5 bombas capaces de bombear entre 300 y 600 L/s cada una, a través de tres tuberías, dos de 400 mm y una de 600 mm.

A continuación se elaboran las curvas bombas-sistema para los diferentes casos que se pueden presentar teniendo en cuenta dos variantes de tuberías de impulsión, primero usándose sólo la de 600 mm y segundo usándose las dos de 400 mm más la de 600 mm.

Para el caso que se presentará cuando se empleen las tres tuberías de impulsión, es necesario calcular una tubería equivalente, que permita confeccionar la curva del sistema de tubería, para ello se debe tener en cuenta los niveles de descarga de cada uno de los conductos, el punto más alto de las tres tuberías es de la de 600 mm que descarga en cota 9 m, los dos conductos de 400 mm descargan en cota 2 m aproximadamente.

Figura. 3 Esquema Estación Norte

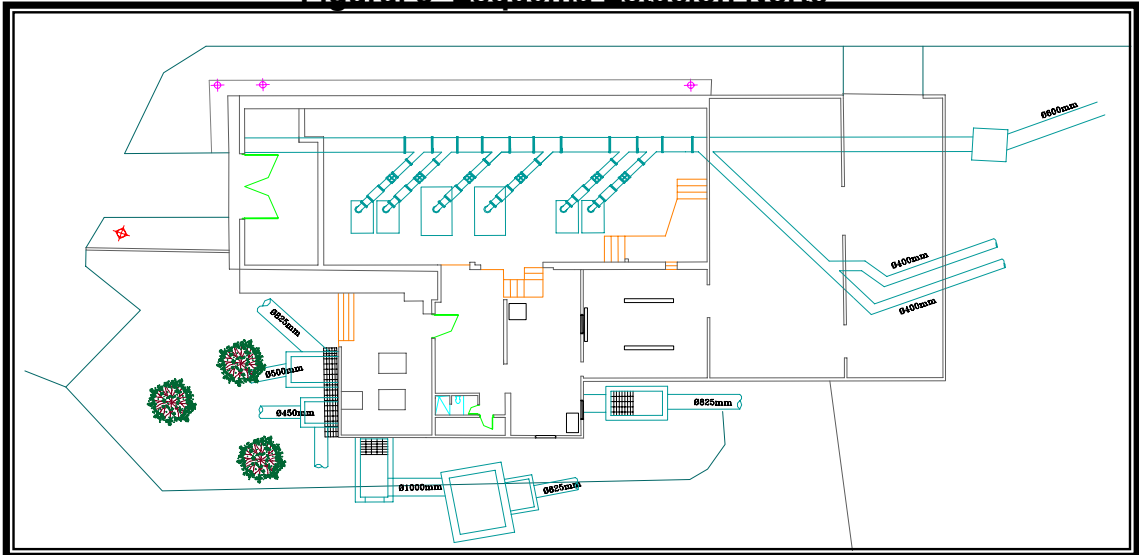
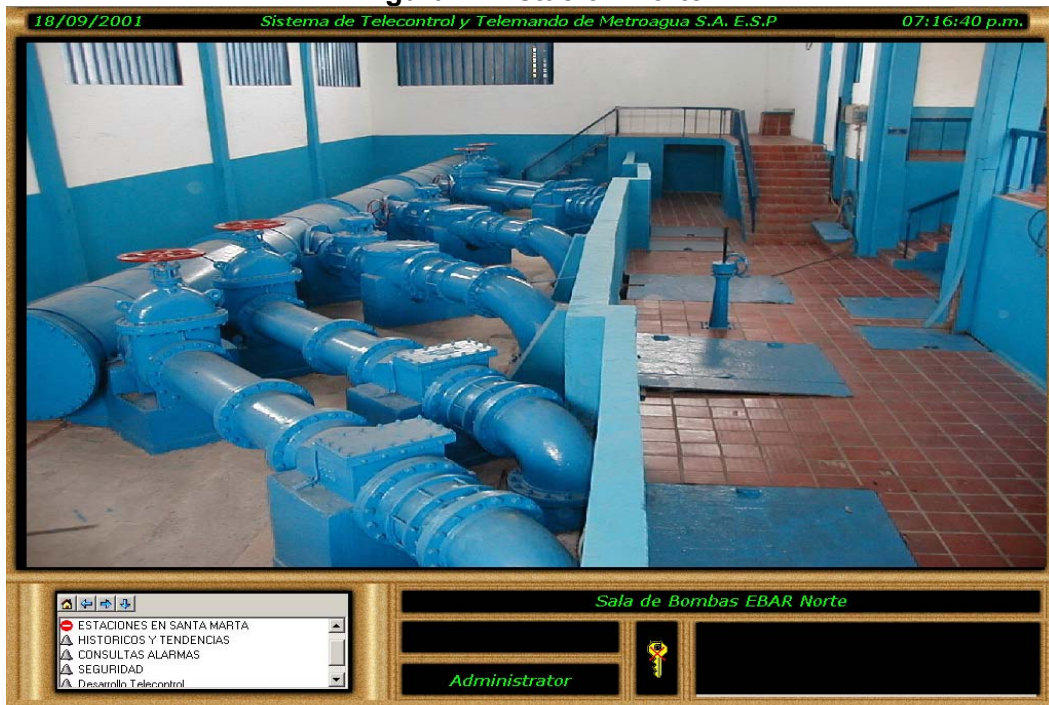


Figura. 4 Estación Norte



## **2. ESTACIONES DE BOMBEO**

### **2.1 CARACTERISTICAS GENERALES DE LAS ESTACIONES DE BOMBEO DE AGUAS RESIDUALES**

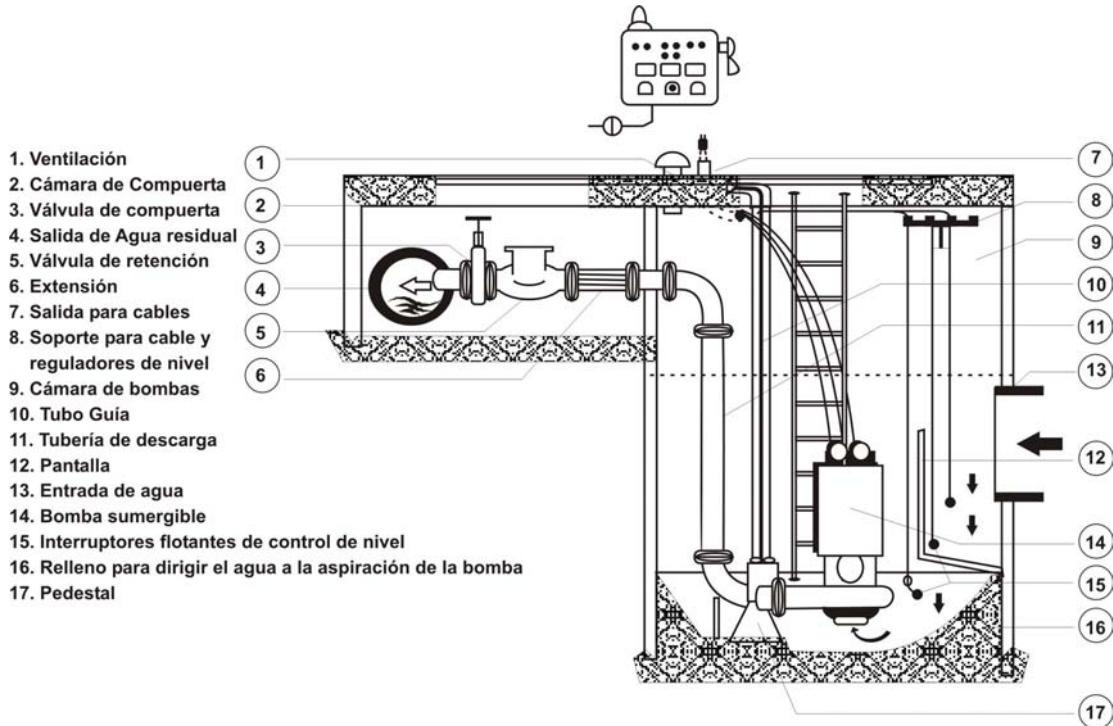
El objeto básico de una estación de bombeo es impulsar las aguas residuales que no pueden ser evacuadas por gravedad a los colectores existentes o al emisario submarino, por esta razón dentro de una estación se incluyen las bombas, tanques de almacenamiento, equipos auxiliares, tableros de control, subestación eléctrica, planta de generación alterna, y para garantizar que el agua bombeada no posea partículas de gran tamaño, estas deben ser tratadas previamente con sistemas de rejillas, desarenador y filtros precoladores como mínimo tratamiento primario.

Las características de diseño de las estaciones de bombeo varían con las capacidades y el método constructivo a emplear. En la Fig. 5 se muestra un diagrama esquemático de una estación de bombeo convencional para aguas residuales.

### **2.2 BOMBAS PARA AGUAS RESIDUALES**

Las bombas utilizadas para bombear aguas residuales son generalmente de doble aspiración, del tipo voluta y equipadas con rodetes inatascables como el mostrado en la Fig. 6. Los ejes de las bombas pueden ser horizontales o

**Figura 5 Estación de Bombeo Sumergible**

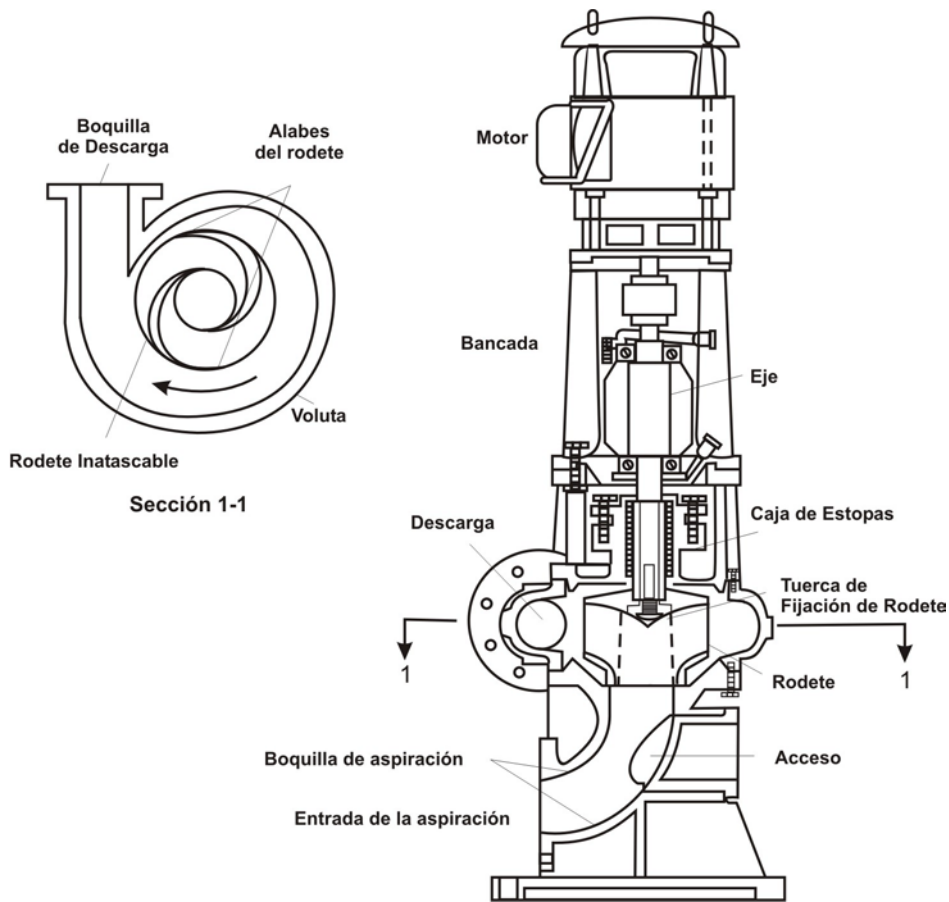


verticales, sin embargo, se prefieren las bombas verticales por cuestión de limitación de espacios. En la Fig. 7 Se muestra una instalación típica de gran capacidad con bombas para aguas residuales de eje vertical.

Las bombas inatascables tienen secciones de paso abiertas y un número mínimo de canales (no excedido en dos, en las de tamaño pequeño y limitado a tres, máximo cuatro, en las de gran capacidad. Véase Fig. 6 )

Prácticamente todos los rodets son cerrados. Las bombas para agua residual deben poder manejar los sólidos que entran en la red de alcantarillado. Es prácticamente normal exigir que las bombas puedan manejar sólidos de 100 mm y hasta valores de 200 mm o más, dependiendo el tamaño de las bombas.

**Figura 6. Bomba Vertical de Flujo Radial**



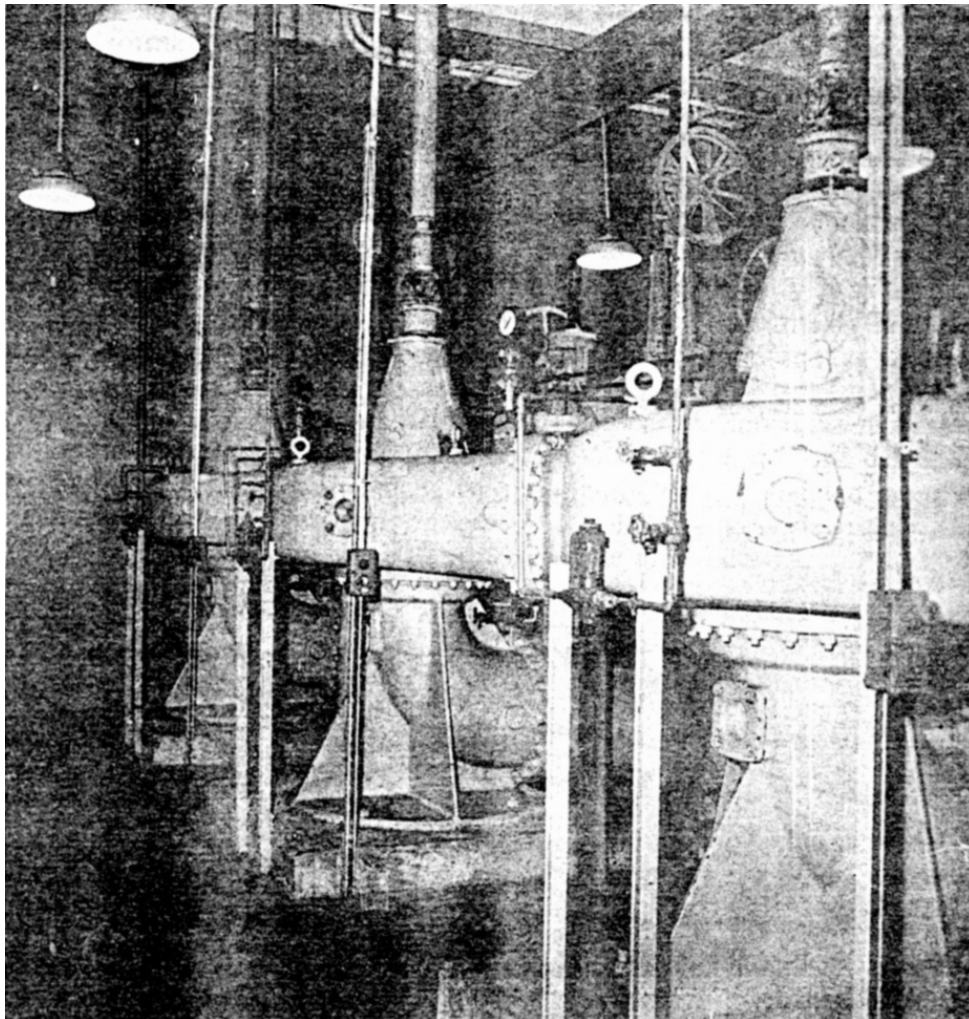
“Bombas inatascables de tamaño inferior a 100 mm no deben emplearse para aguas residuales que no hayan sufrido un tratamiento previo”<sup>5</sup>.

### 2.3 BOMBAS SUMERGIBLES

<sup>5</sup> Metcalf – Eddy. Ingeniería sanitaria redes de alcantarillado y bombeo de aguas residuales. Editorial Labor. P 298

Las bombas sumergibles inatascables están en el mercado desde hace muchos años, aunque su uso en redes de alcantarillado ha estado restringido debido a los problemas de mantenimiento que conllevan. Sin embargo, este tipo de bombas se le incorpora un sistema de fijación que permite su extracción sin afectar a la tubería de descarga mediante unas guías, a lo largo de las cuales se desliza la bomba. Ver Fig. 8

**Figura 7. Instalación Típica de Bombas de Aguas Residuales**



**Figura 8. Bomba Sumergible con Carril Guía**

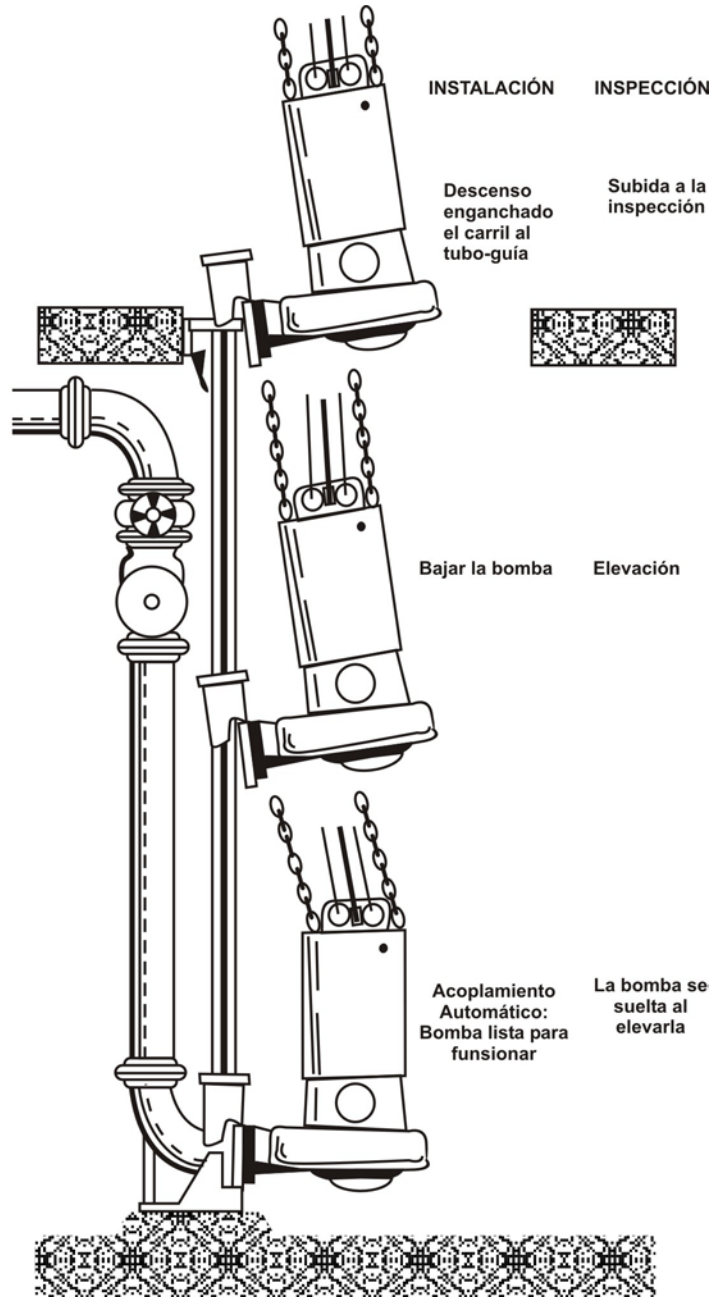
**Carril guía**

**Ventanas de Instalación**

Un Sencillo carril guía permite la conexión de la bomba al pedestal por gravedad. La bomba se baja encarrilada por un tubo guía de 2" o 3" (Dependiendo del tamaño de la bomba) en posición ligeramente inclinada.

Cuando esta cerca del pedestal una pestaña de la bomba se conecta con una pequeña guía, y asegura un perfecto acoplamiento.

Cuando la bomba está en posición se afloja la cadena y el peso es suficiente para quedar unida al pedestal. Para inspeccionar y dar servicio a la bomba se saca del pozo fácilmente sin más que tirar de ella por la cadena: Los operarios no tienen la necesidad de bajar al pozo.





## **2.4 ANALISIS DE LOS SISTEMAS DE BOMBEO**

La aplicación del análisis de sistemas a una estación de bombeo tiene por finalidad seleccionar las bombas más adecuadas y definir sus puntos de funcionamiento.

Este análisis consiste en el cálculo de las curvas del sistema y el uso de las mismas en conjunción con las curvas características de las bombas disponibles.

Los sistemas de bombeo pueden ser de dos (2) tipos: de una bomba o de varias bombas. En el campo de las aguas residuales el tipo más normal de estación de bombeo tiene dos (2) o mas bombas funcionando en paralelo.

### **\* Campo De Funcionamiento**

Una bomba funciona mejor en su punto de máximo rendimiento, el cual viene limitado por las curvas de caudal-altura. En este punto, los esfuerzos radiales sobre los cojinetes son mínimos. Estos esfuerzos radiales se incrementan notablemente a medida que el punto de funcionamiento se separa del de máximo rendimiento, sea en una u otra dirección. Cuando el caudal de la bomba sobrepasa al correspondiente al punto de máximo rendimiento, la presión absoluta necesaria para evitar la cavitación aumenta de tal manera que, además de los problemas de esfuerzos radiales, la cavitación se convierte en un problema potencial.

Cuando el caudal descargado por la bomba desciende hacia el punto de válvula cerrada (altura a caudal cero) la recirculación del líquido impulsado dentro del rodete da lugar a vibraciones y a pérdidas hidráulicas en la bomba

y puede producir cavitación. “Es de buena práctica limitar el intervalo de funcionamiento de las bombas entre el 60° y 120° al punto de máximo rendimiento. Este intervalo puede ampliarse en funcionamiento a bajas velocidades”.<sup>6</sup>

En el campo de las aguas residuales, el tipo más normal de estación de bombeo tiene una o más bombas funcionando en paralelo o serie.

#### **2.4.1 Funcionamiento En Paralelo**

Cuando dos (2) o más bombas funcionan en paralelo descargando sobre la misma tubería de impulsión, la curva de altura-capacidad del conjunto puede hallarse sumando los caudales de cada curva modificada para una altura dada (Ver Fig. 9 a).

El punto de intersección de la curva del conjunto con la del sistema proporcionan la capacidad total del conjunto de las bombas y la altura modificada a la que trabaja cada una de ellas. Entrando con estas alturas en cada una de las curvas características modificadas, puede conocerse el caudal descargado por cada bomba, su eficiencia y la potencia del freno necesario en esas condiciones de funcionamiento. Para encontrar la altura total a la que trabaja cada bomba, hay que desplazarse verticalmente a caudal constante, desde la curva característica modificada hasta la curva característica original correspondiente.

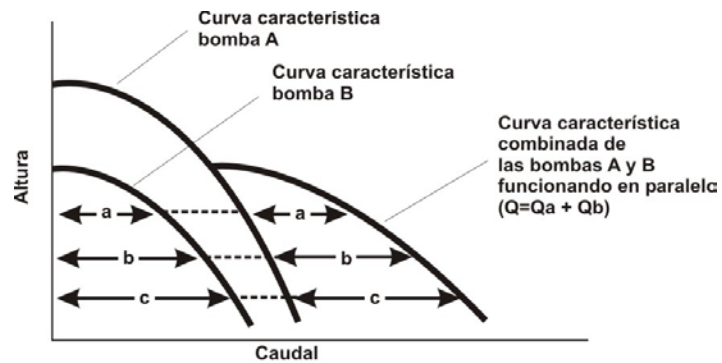
Las especificaciones de las bombas deben hacerse de manera que los mismos puedan trabajar a esa altura manométrica.

---

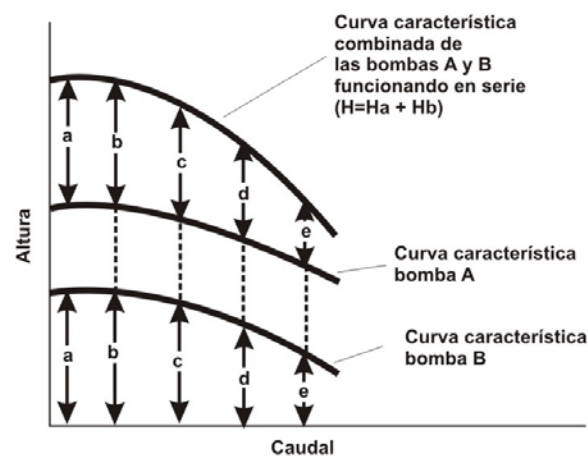
<sup>6</sup> Ídem , p 340

Cada bomba puede funcionar en diversos puntos de su curva característica, aumentando la altura y disminuyendo el caudal a medida que van entrando en funcionamiento simultáneo otras bombas.

**Figura 9. Bombas en Serie y Paralelo**



A. Funcionamiento en paralelo



B. Funcionamiento en Serie

Debe hacerse un esfuerzo para limitar los puntos de funcionamiento a los comprendidos dentro de un intervalo de caudales entre el 60° y 120° del punto de máximo rendimiento.

## **2.4.2 Funcionamiento En Serie**

A menudo, se instalan una o varias bombas de sobrepresión en la tubería de aspiración o de impulsión de una estación de bombeo, a fin de superar algún condicionante específico. Las bombas instaladas en serie se usan para incrementar la capacidad de la estación de bombeo y la descarga de las bombas.

La curva conjunta del sistema se obtiene sumando las alturas de cada bomba para cada caudal (Ver Fig. 9 b).

## **2.5 TRATAMIENTO PRIMARIO DE AGUAS RESIDUALES**

El tratamiento primario consiste en hacer pasar las aguas residuales inicialmente por unas rejillas para eliminar partículas de gran tamaño, después por un desarenador para eliminar las arenas y luego por los filtros percoladores, para llegar al tanque de almacenamiento, donde está la cámara de aspiración o pozo de bombeo y de ahí enviarla al emisario submarino.

### **2.5.1 Rejillas**

Las rejillas se utilizan para separar material grueso del agua, puede ser cualquier material agujerado ordenadamente, por ejemplo una plancha o lámina metálica, de manera o de concreto, con agujeros redondos, cuadrados o de cualquier forma geométrica (Ver Fig.10. y 11.). También pueden construirse con una celosía fija o emparrillado de barras o varillas de hierro o de acero.

De acuerdo con el método de limpieza, las rejillas son de limpieza manual o mecánica. Según el tamaño de las aberturas se clasifican como rejillas gruesas o finas. “Las gruesas son aquellas con aberturas iguales o mayores de 0,64cm (1/4 pulgada), mientras que las finas tienen aberturas menores de 0,64cm.”<sup>7</sup>

En el tratamiento de aguas residuales se usan rejillas gruesas, principalmente de barras o varillas de acero, para proteger bombas, válvulas, tuberías y equipos, etc., del taponamiento o interferencia causada por trapos, tarros y objetos grandes.

La cantidad de material retenido varía mucho, dependiendo del tipo de rejilla, del espaciamiento o abertura, del sistema de alcantarillado y de la población aportante. La WPCF<sup>8</sup> sugiere valores entre 3,5 – 37,5 ml/m<sup>3</sup> de agua residual tratada y un valor promedio de 15 ml/m<sup>3</sup>.

Para la disposición del material retenido se usan diferentes métodos tales como:

- Descarga a un molino, triturador o desmenuzador y recirculación a la planta de tratamiento.
- Remoción y disposición en un relleno sanitario.
- Incineración, especialmente en plantas grandes.

---

<sup>7</sup> Romero Jairo y Rojas Alberto. Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño- Escuela colombiana de ingeniería p287

<sup>8</sup> WPCF sigla en inglés de water Pollution Control Federation

Figura 10. Rejilla Inclinada de Limpieza manual

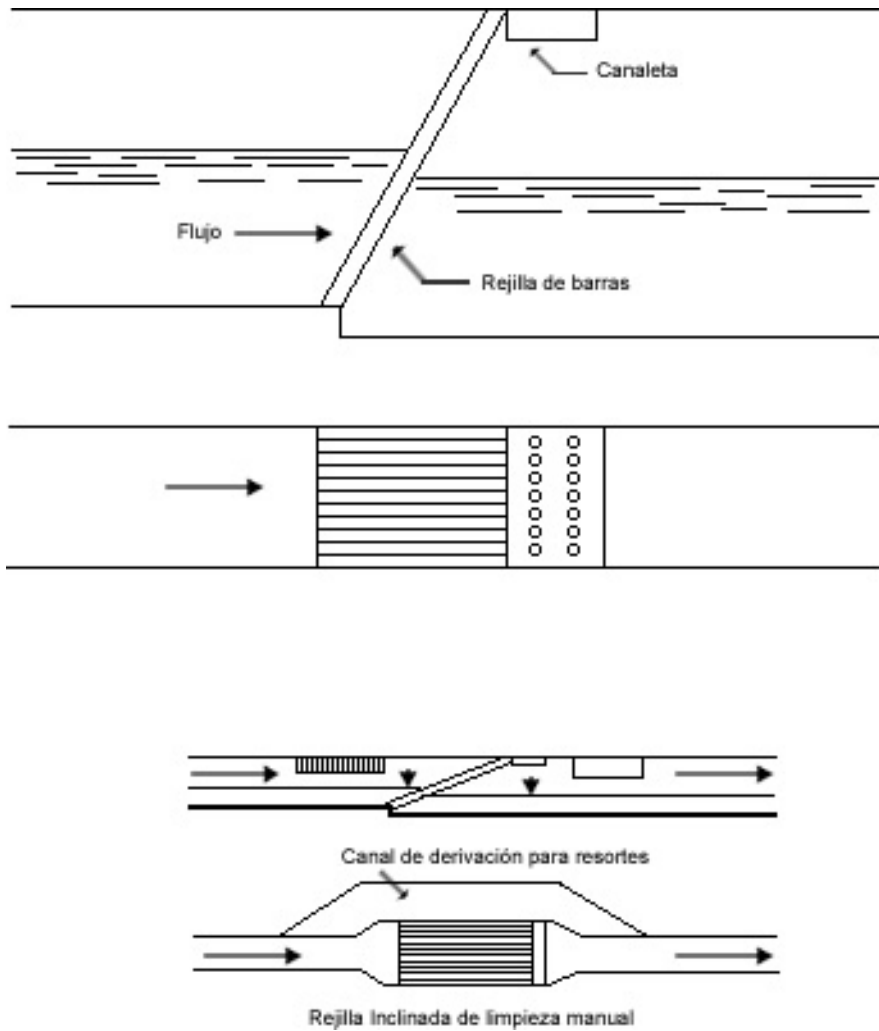
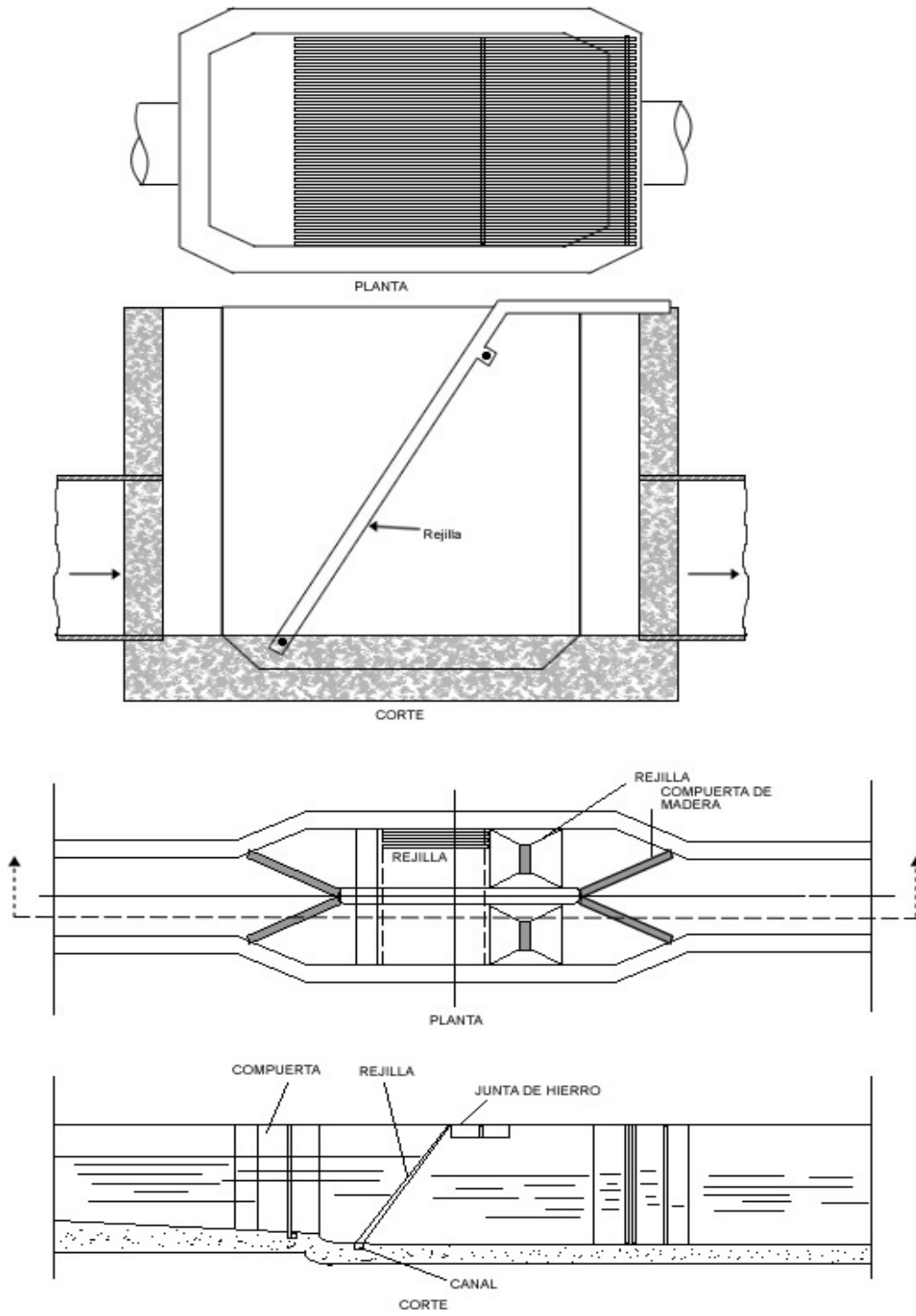


Figura 11. Cámara de Rejillas



### 2.5.2 Desarenadores.

Los desarenadores, en tratamientos de aguas residuales se usan para remover arena, grava, partículas u otro material sólido pesado que tenga velocidad de asentamiento o peso específico bastante mayor que el de los sólidos orgánicos desagradables de las aguas residuales.

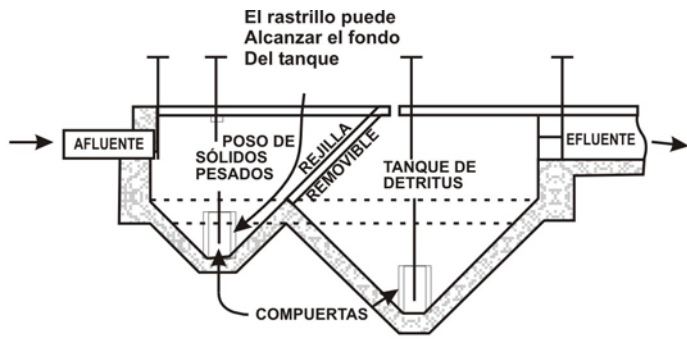
Los desarenadores protegen el equipo mecánico de desgaste anormal y reducen la formación de depósitos pesados en tuberías, canales y conductos.

Los desarenadores pueden ubicarse antes de todas las demás unidades de tratamiento, si con ello se facilita la operación de las demás etapas del proceso. Sin embargo, la instalación de rejillas, antes del desarenador, también facilita la remoción de arena y la limpieza de los canales de desarenado. Los desarenadores pueden ser del tipo de limpieza mecánico o manual. El diseño depende del tipo de flujo y del equipo relimpieza seleccionado. El tipo de desarenador más usado es el de flujo horizontal, en el cual el agua pasa a lo largo del tanque en dirección longitudinal (Ver Fig. 12) la velocidad horizontal del agua se controla mediante las dimensiones de la unidad o mediante un vertedero de sección especial a la salida.

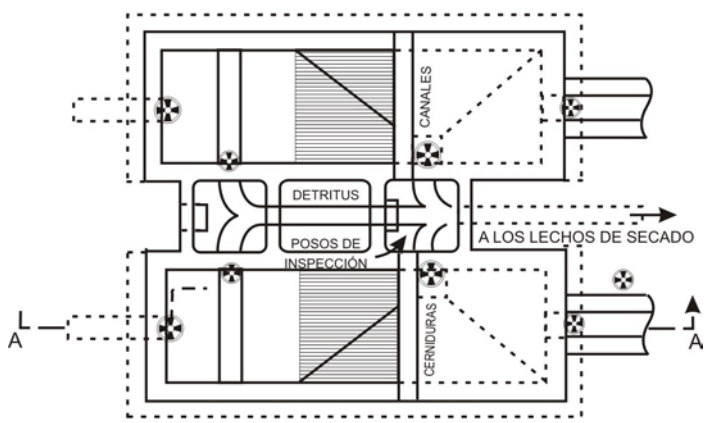
- **CANTIDAD DE ARENA:** La cantidad de arena varía mucho de una a otra localidad. Depende, entre otros factores, del tipo de alcantarillado, de las características del área de drenaje, de las condiciones y tipo de alcantarillado, de la frecuencia de lavado de las calles, del tipo de residuos industriales, del número de desmenuzadores de basura servidos, de la población servida y de la proximidad de playas, balnearios y canteras o zonas de explotación de materiales de construcción.



**Figura 12. Desarenadores**



**CORTE A-A**



Rejillas y Desarenadores.

“La cantidad de arena a disponer de un desarenador de aguas residuales, oscila entre 4 – 200 ml/m<sup>3</sup> de agua tratada\* con un valor típico de 150 ml/m<sup>3</sup> “<sup>9</sup>.

La arena removida incluye una cantidad de impureza, material orgánico y putrefacto. Por ello, si no se dispone rápidamente, se presentan olores desagradables y el material atraerá insectos y roedores. Posiblemente, el método más económico de disposición sea en un relleno sanitario.

<sup>9</sup> Romero Jairo y Rojas Alberto. Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño- Escuela colombiana de ingeniería p295

### **2.5.3 Filtros Percoladores**

El filtro percolador o biofiltro es un proceso muy usado para el tratamiento de aguas residuales. El filtro biológico no es un proceso diseñado para ejercer una verdadera acción de tamizado o filtración de agua residual sino para poner en contacto aguas residuales con biomasa adherida a un medio de soporte fijo, constituyendo un lecho de oxidación biológica, como se muestra en la Fig. 13

Un filtro percolador tiene por objeto reducir la carga orgánica existente en aguas residuales. Consiste en un lecho de piedras, u otro medio natural o sintético, sobre el cual se aplican las aguas residuales, con el consecuente crecimiento de microorganismos, lamos o películas microbiales sobre el lecho.

“El lecho del filtro es un medio altamente permeable, usualmente es de piedra cuyo tamaño varía entre 2.5 y 10 cm., profundidad variable según el diseño, generalmente de 1 a 2.5 m. El filtro es usualmente circular, con distribuidor rotatorio superficial del agua”<sup>10</sup> .

### **2.5.4 Cámara de Aspiración**

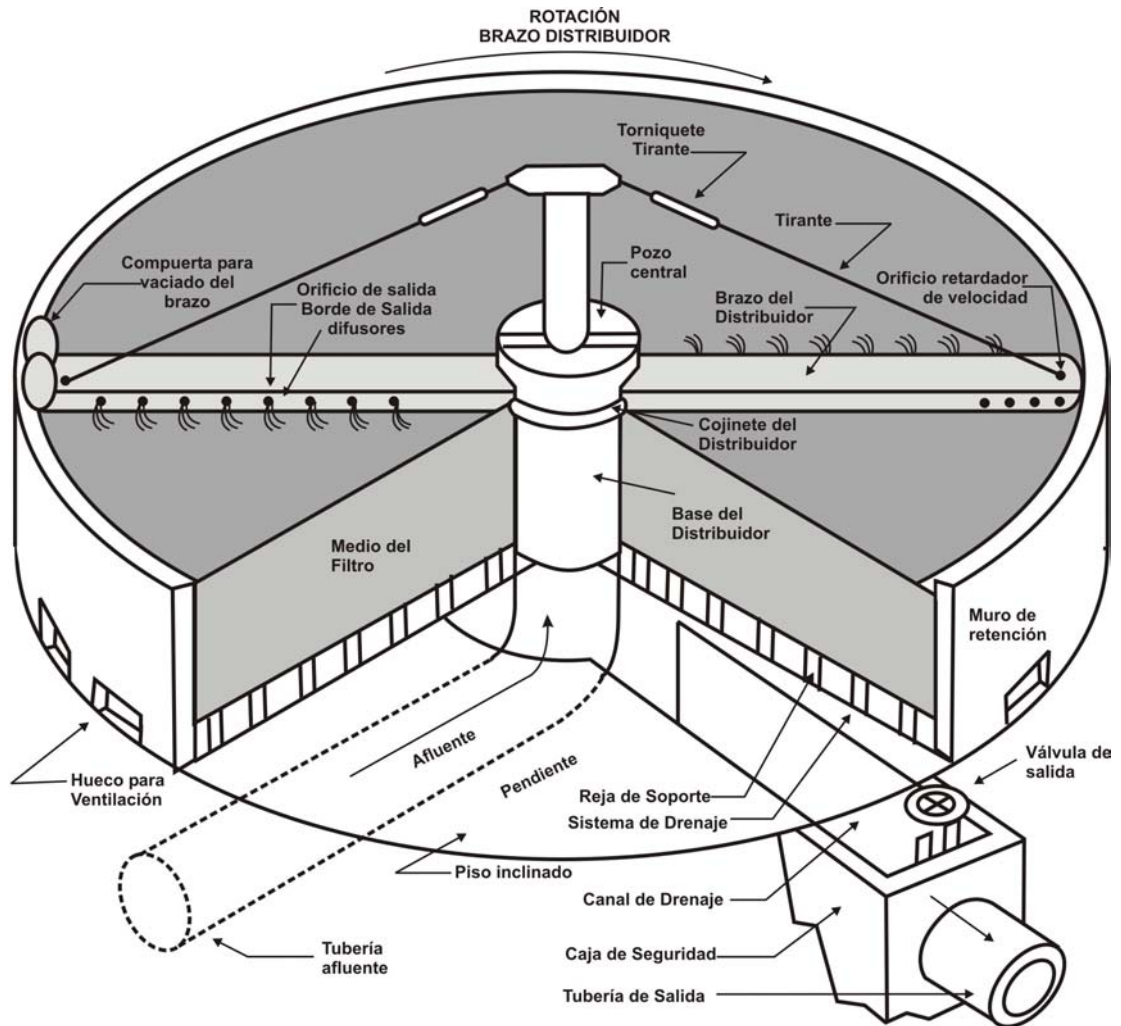
La cámara de aspiración o pozo de bombeo es necesario para el almacenamiento del agua residual antes de su bombeo. El volumen de almacenamiento depende del tipo de bombas, ya sean de velocidad constante o variable. Si se eligen bombas de velocidad constante, el volumen debe ser suficiente para evitar que los ciclos de funcionamiento

---

<sup>10</sup> Ídem , p 302

sean demasiados cortos, lo cual supone una frecuencia elevada de arranques y paradas.

**Figura 13. Filtro Percolador**



Otra función es conseguir que exista suficiente sumersión en la aspiración de las bombas para eliminar la formación de vórtices y hacer que la transición del caudal desde la alcantarilla a las tuberías de aspiración de las bombas sea lo más gradual posible. “Muchos problemas de funcionamiento de las bombas resultan del diseño inadecuado de la cámara de aspiración, entre los

cuales la prerrotación del agua y la formación de turbulencias que afecta a la altura de aspiración y al rendimiento de las bombas” <sup>11</sup> .

## **2.6. CONDICIONES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

Las condiciones óptimas de operación y mantenimiento de un sistema de tratamiento de aguas residuales depende de las características físicas, sociales y económicas prevalentes en el sitio de localización de la planta, las cuales deben tenerse en cuenta al definir el diseño del sistema, porque ellas establecen la confiabilidad, flexibilidad, requerimientos de personal técnico. Grado de automatización y control de proceso, y costos de la operación y mantenimiento.

Todo sistema de tratamiento de aguas residuales debe estar diseñado de tal manera que, cuando se opere adecuadamente, produzca en forma continua el caudal y calidad de efluente requerido.

Si existen equipos, éstos han de funcionar satisfactoriamente dentro de cualquier rango posible de operación a los requerimientos de cada momento. Se tiene que contar con equipos de laboratorio que permitan determinar las características esenciales de operación, hacer los ajustes requeridos y controlar la calidad del efluente.

El sistema de tratamiento debe estar en capacidad de operar continuamente, aun en los casos en que sea necesario sacar de operación un equipo para su mantenimiento o reparación. Esto supone la existencia de dos o más

---

<sup>11</sup> Ídem , p 305

unidades de repuesto o de reserva y la previsión, en el diseño, de suficientes accesorios y conexiones que faciliten la derivación o el aislamiento de los equipos de operación crítica.

La experiencia indica que el costo inicial y los costos de operación y mantenimiento constituyen el factor primordial al adoptar una solución de control de contaminación hídrica exitosa. Por otra parte, un sistema de tratamiento de baja confiabilidad no garantiza la producción de un efluente de la calidad requerida y convierte la operación del sistema en un problema que obliga a poner atención y destinar recursos excesivos a esta actividad. La disponibilidad de personal técnico altamente calificado y de suficientes recursos económicos es prerrequisito para la adopción de diseños con equipos mecánicos complejos, consumos permanentes de energía y niveles de control y automatización altos.

Finalmente, la flexibilidad de los procesos para aceptar modificaciones futuras, que aseguren una optimización factible, mediante la adición de equipos o tecnología innovadora, es un factor de gran influencia sobre el diseño.

En resumen, los principales factores de importancia en la selección de procesos y operaciones de tratamiento son los siguientes:

- **Factibilidad.** El proceso debe ser factible y, por consiguiente, compatible con las condiciones existentes de dinero disponible, terreno existente y aceptabilidad del cliente o de la comunidad propietaria del mismo.
- **Aplicabilidad.** El proceso debe ser capaz de proveer el rendimiento solicitado, es decir, estar en capacidad de producir un efluente con la calidad requerida para el rango de caudales previsto.

- **Confiabilidad.** El proceso debe ser lo más confiable posible, esto es, que sus condiciones óptimas de trabajo sean difíciles de alterar, que tenga capacidad de soporte de cargas y caudales extremos y mínima dependencia de tecnología u operación compleja.
- **Costos.** El proceso ha de ser de costo mínimo. La comunidad o el propietario debe estar en capacidad de costear todos los compuestos del sistema de tratamiento, así como su operación y mantenimiento.
- **Características del afluente.** Estas determinan la necesidad de pretratamiento primario o tratamiento secundario, tipo de tratamiento (físico, químico, biológico o combinado), necesidad de neutralización o de igualamiento, así como el tamaño, cinética y tipo de reactor.
- **Procesamiento y producción de lodos.** La cantidad y calidad del lodo producido determina la complejidad del tratamiento requerido para su disposición adecuada. Procesos sin problemas de tratamiento y disposición de lodos son los ideales.
- **Requerimiento de personal.** Procesos sencillos requieren menos personal, menor adiestramiento profesional y, por tanto, son más ventajosos.

En un país como Colombia es esencial seleccionar sistemas de tratamiento de aguas residuales con base en el siguiente principio básico de diseño:

- El dinero disponible para tratamiento de aguas residuales es escaso, por lo que las obras de control de polución deben satisfacer los requerimientos de tratamiento a un costo de operación y mantenimiento mínimo.

### 3. MEDIDAS DE CONFIABILIDAD

#### 3.1 FUNCION DE CONFIABILIDAD

Se acostumbra a representar la duración de un componente como una variable aleatoria y aplicar los conceptos de teoría de probabilidades.

La confiabilidad (R) es definida como la probabilidad de que un equipo funcione por encima de un período de tiempo (t) Para expresar ésta relación matemáticamente, se define ( $\tau$ ) como la variable aleatoria que representa la vida de un equipo cualquiera. Para estimar o predecir el comportamiento de una variable aleatoria es conveniente conocer su función de distribución de probabilidad.

La confiabilidad puede ser expresada como:

$$R(t) = \Pr\{\tau \geq t\}$$

Ecuación. 1 Función de Probabilidad.

Da la probabilidad de que la vida  $\tau$  tenga un valor superior o igual a t o equivalentemente, para que el equipo no falle antes de un tiempo t.

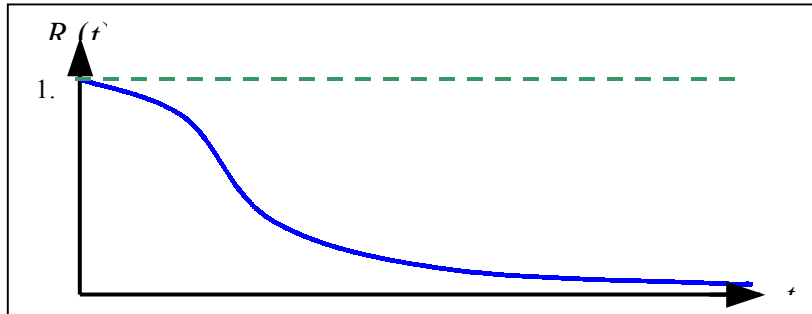
Donde

$$R(0) = 1$$

y 
$$\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0$$

La función  $R(t)$  recibe el nombre de Función de Confiabilidad

**Figura. 14 Función de Confiabilidad**



Paralelamente, se define:

$$F(t) = 1 - R(t) = \Pr \{ \tau < t \}$$

**Ecuación. 2 Función de Distribución de Fallas Acumuladas.**

Nos da la probabilidad de que la vida o duración tenga un valor menor a un tiempo dado t.

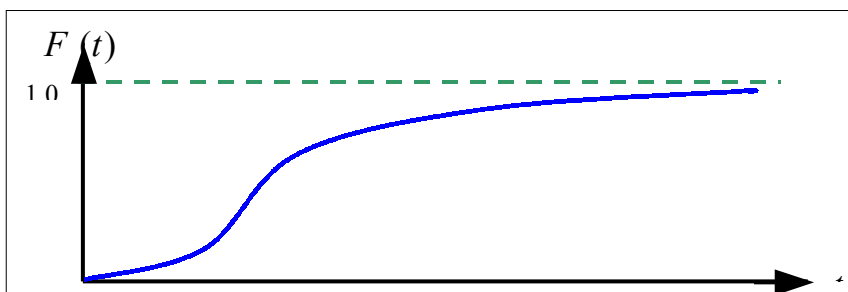
Donde

$$F(0) = 0$$

y 
$$\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1$$

La función  $F(t)$  es la Función de distribución de fallas acumuladas.

**Figura. 15 Función de Distribución de Fallas Acumuladas**





Una tercera función definida como:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$$

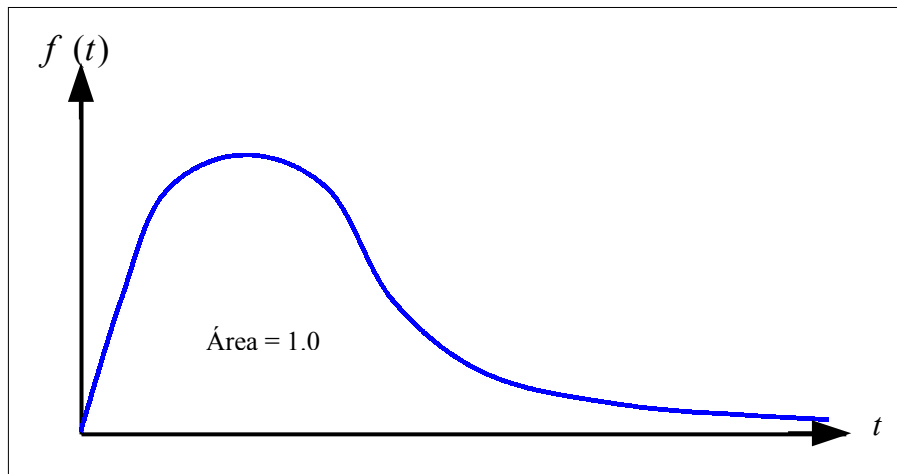
Ecuación. 3 Función de Densidad de Probabilidad de Fallas.

*Esta función describe la forma de la distribución de fallas.*

Donde  $f(t) \geq 0$

y  $\int_0^{\infty} f(t) dt = 1$

Figura. 16 Función de Densidad de Probabilidad de Fallas



La función de confiabilidad y la función de distribución de fallas acumuladas representan el área bajo la curva definida  $f(t)$ . Por lo tanto, como el área bajo la curva es igual a 1, la confiabilidad y la distribución de fallas acumuladas será definida como:

$$0 \leq R(t) \leq 1 \quad 0 \leq F(t) \leq 1$$

### 3.2 TASA DE FALLA

La tasa de falla es otra función usada con frecuencia en confiabilidad, además de las funciones de probabilidad definidas anteriormente. Ésta nos proporciona una tasa de falla instantánea en un momento  $t$ .

$$\Pr\{t \leq \tau \leq t + \Delta t\} = R(t) - R(t + \Delta t)$$

Ecuación. 4 Probabilidad de Falla en un Intervalo de Tiempo

Y la probabilidad condicional de una falla en un intervalo de tiempo de  $t$  a  $t + \Delta t$ , dado que el sistema ha sobrevivido a un tiempo  $t$  es

$$\Pr\{t \leq \tau \leq t + \Delta t \mid \tau \geq t\} = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)}$$

Entonces

$$\frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t) \Delta t}$$

Ecuación. 5 Probabilidad Condicional de la Tasa de Falla

Es la probabilidad condicional de una falla por unidad de tiempo (tasa de fallo). Por lo tanto

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{-[R(t + \Delta t) - R(t)]}{\Delta t} \cdot \frac{1}{R(t)}$$
$$\lambda(t) = \frac{-dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)}$$

Ecuación. 6 Deducción de la Función de Tasa de Falla

Y de la ecuación 6 se obtiene:

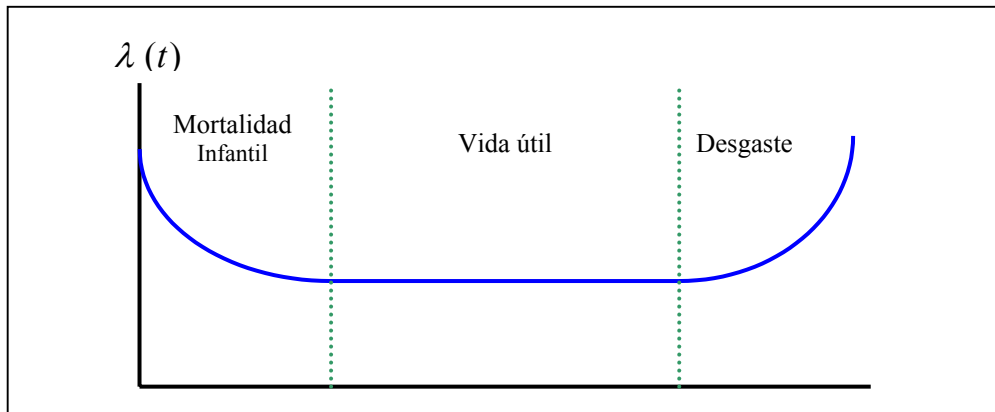
$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Ecuación. 7 Función de Tasa de Falla

### 3.3 CURVA DE LA BAÑERA

La función de tasa de falla es particularmente interesante ya que permite escoger las políticas de mantenimiento más adecuadas para un equipo. Por su forma característica es conocida como curva de la bañera y expresa los tres períodos típicos de un equipo: mortalidad infantil, vida útil y desgaste, como se muestra en la figura 17.

Figura. 17 Curva de la Bañera.



#### 3.3.1 Mortalidad Infantil

Es el período al inicio de la operación, donde con frecuencia ocurren fallas prematuras debidas a defectos no detectados, defectos de diseño no corregidos, errores en la fabricación y montaje. El tipo de falla es decreciente con el tiempo.

### **3.3.2 Vida Util**

Es el segundo intervalo de la gráfica donde la tasa de fallas es constante y aleatorias no depende del tiempo transcurrido desde la última falla, durante el cual se espera que el equipo desempeñe la mayoría de las funciones.

### **3.3.3 Desgaste.**

Es el último intervalo de la curva, donde la tasa de falla aumenta sostenidamente porque los elementos del equipo sufren un proceso de deterioro físico debido al roce mecánico u otras consideraciones. En determinado momento, los costos de mantenimiento e indisponibilidad serán tan elevados que el equipo deberá sustituirse. Alternativamente, podría implantarse una política de sustitución de elementos que permitiera aumentar el período de vida útil.

La curva de tasa de falla es de gran ayuda para estudiar la confiabilidad y tomar medidas adecuadas para mejorarla. Por ejemplo, si un equipo presenta una alta tasa de fallo en el período infantil, es conveniente someterlo a un funcionamiento previo de rodaje controlado. Por otra parte, saber cuando se inicia el desgaste, permite reducir el riesgo de fallas mediante un mantenimiento preventivo o el reemplazo de componentes antes de que comience el desgaste. Más aún, cuando la tasa de falla presenta un valor constante, no se justifica programar un mantenimiento preventivo, pues las probabilidades de falla serían iguales para el componente nuevo y para el que lleva ya un tiempo de servicio.

### 3.4 TIEMPO MEDIO ENTRE FALLAS, MTBF

Muchas veces se desea comparar la confiabilidad de dos equipos competitivos. Una de las medidas más usuales en estos casos, aunque no la única, es el tiempo medio de operación sin fallas, es decir la vida media entre cada uno de ellos. En aquellos casos en que una unidad fallada es reemplazada o se repara de tal forma que su vida esperada sea igual a la de una nueva unidad, es más usual hablar del tiempo medio entre fallas, más conocido por sus siglas en inglés como MTBF.

$$E(TBF) = MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

Ecuación. 8 Tiempo Medio entre Fallas, *MTBF*

### 3.5 DISTRIBUCION EXPONENCIAL

Describe la situación donde la función de tasa de falla es constante. Es la más común entre las distribuciones de fallas, su importancia radica en el hecho de que casi todos los componentes tienen, durante su período de operación normal, una intensidad de falla constante. La distribución exponencial es la única que posee una intensidad constante de fallas.

Esta distribución tiene la ventaja de su simplicidad en el momento de realizar los cálculos y la facilidad de operar con ella, que en algunos casos su utilización puede ser indebida.

Siempre que las fallas sean aleatorias y no dependan del tiempo que la unidad lleva funcionando, o cuando las reparaciones constituyen

principalmente intercambio de piezas estándar se puede pensar en una distribución de exponencial de fallas. Ésta distribución es comúnmente usada para modelar el tiempo de vida de componentes electrónicos y es apropiado cuando un componente usado que aun no ha fallado es estadísticamente tan bueno como un componente nuevo.

A continuación se presentan las principales características de ésta distribución:

### 3.5.1 Función de Confiabilidad $R(t)$

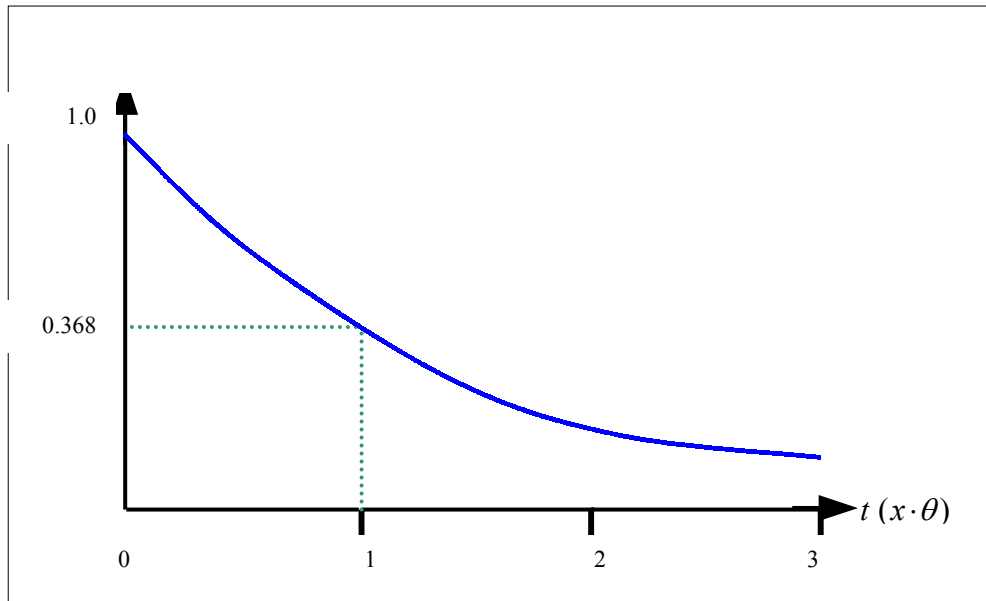
$$R(t) = \exp(-\lambda \cdot t)$$

**Ecuación.9 Función de Confiabilidad para la Distribución Exponencial**

Donde:

$$\theta = \text{MTBF} \qquad \theta = \lambda^{-1}$$

**Figura. 18 Función de Confiabilidad para la Distribución Exponencial**

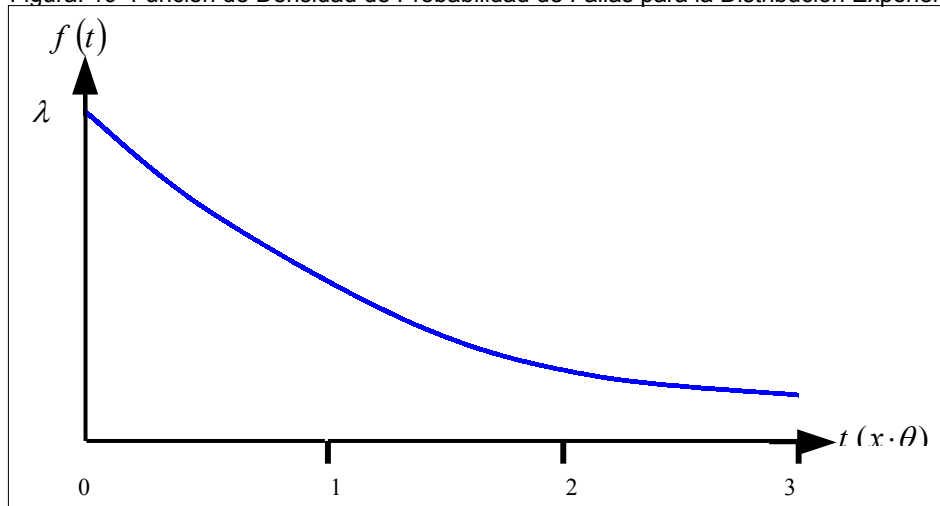


### 3.5.2 Función de Densidad de Probabilidad de Fallas $f(t)$

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda \cdot t)$$

Ecuación. 10 Función de Densidad de Probabilidad de Fallas para la Distribución Exponencial

Figura. 19 Función de Densidad de Probabilidad de Fallas para la Distribución Exponencial

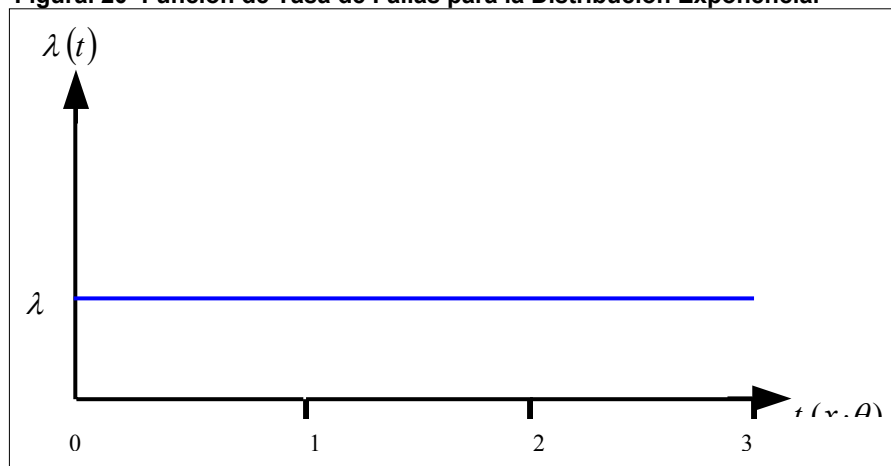


### 3.5.3 Función de Tasa de Falla $\lambda(t)$

$$\lambda(t) = \lambda = \theta^{-1}$$

Ecuación. 11 Función de Tasa de Fallas para la Distribución Exponencial

Figura. 20 Función de Tasa de Fallas para la Distribución Exponencial



### 3.6 DISTRIBUCION WEIBULL

Es una expresión semi-empírica muy útil, desarrollada por el matemático sueco Waloddi Weibull <sup>12</sup> en el año 1951, aplicada en su estudio de resistencia a la fatiga del acero, cuando trataba de encontrar una distribución que describiera la expresión de confiabilidad en rodamientos de bolas.

La distribución de Weibull posee, en su forma general, tres parámetros lo que le da una gran flexibilidad. Ellos son:

- ❖ Parámetro de posición ( $\gamma$ ): el más difícil de estimar y por este motivo se asume con demasiada frecuencia que vale cero. Indica el lapso en el cual la probabilidad de falla es nula.
- ❖ Parámetro de característica de vida ( $\eta$ ): su valor es determinante para fijar la vida útil del producto o del sistema. Cuando  $\eta = 0$  y  $\beta = 1$ , representa la vida útil.
- ❖ Parámetro de forma ( $\beta$ )

Seleccionando adecuadamente los valores de los parámetros es posible obtener mejores ajustes que los obtenidos con otras distribuciones.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los períodos de la curva de la bañera, asociados al parámetro  $\beta$  de la distribución Weibull:

---

<sup>12</sup> Weibull, w A Staiscal distribution funcion of wide aplicability.



**Tabla 3. Parámetro de Forma Weibull Asociado a la Curva de la Bañera.**

Valor ( $\beta$ )	Característica
$\beta < 1$	Tasa de falla decreciente (Mortalidad infantil)
$\beta \cong 1$	Tasa de falla constante (Vida útil)
$\beta > 1$	Tasa de falla creciente (Desgaste)

En la siguiente tabla se puede observar las características del parámetro de forma de Weibull ( $\beta$ )

**Tabla 4. Parámetro de Forma Weibull.**

Valor ( $\beta$ )	Característica
$0 < \beta < 1$	Tasa de falla decreciente
$\beta = 1$	Distribución Exponencial
$1 < \beta < 2$	Tasa de Falla creciente, cóncava
$\beta = 2$	Distribución Rayleigh
$\beta > 2$	Tasa de Falla creciente, convexa
$3 \leq \beta \leq 4$	Tasa de Falla creciente se aproxima a la distribución Normal; simétrica

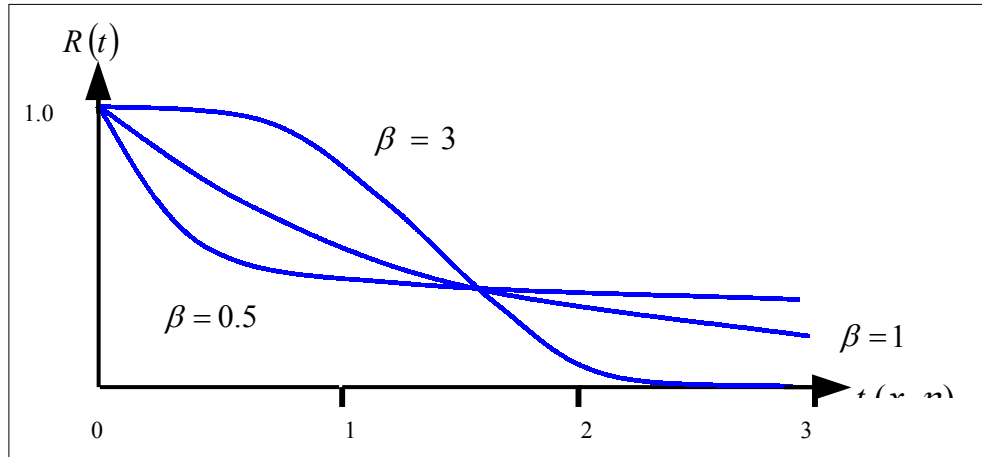
A continuación se presentan las principales características de ésta distribución:

### 3.6.1 Función de Confiabilidad $R(t)$

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

**Ecuación. 12 Función de Confiabilidad para la Distribución Weibull**

Figura. 21 Función de Confiabilidad para la Distribución Weibull

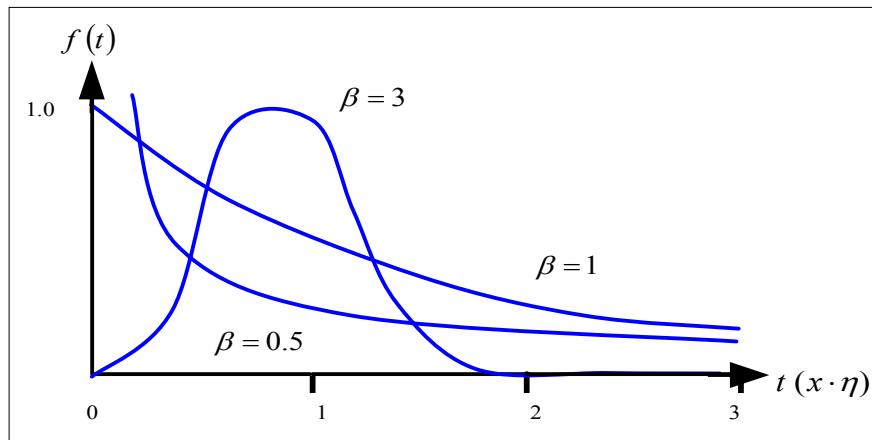


### 3.6.2 Función de Densidad de Probabilidad de Fallas $f(t)$

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

Ecuación. 13 Función de densidad de Probabilidad de Fallas para la Distribución Weibull

Figura. 22 Función de Densidad de Probabilidad de Fallas para la Distribución Weibull

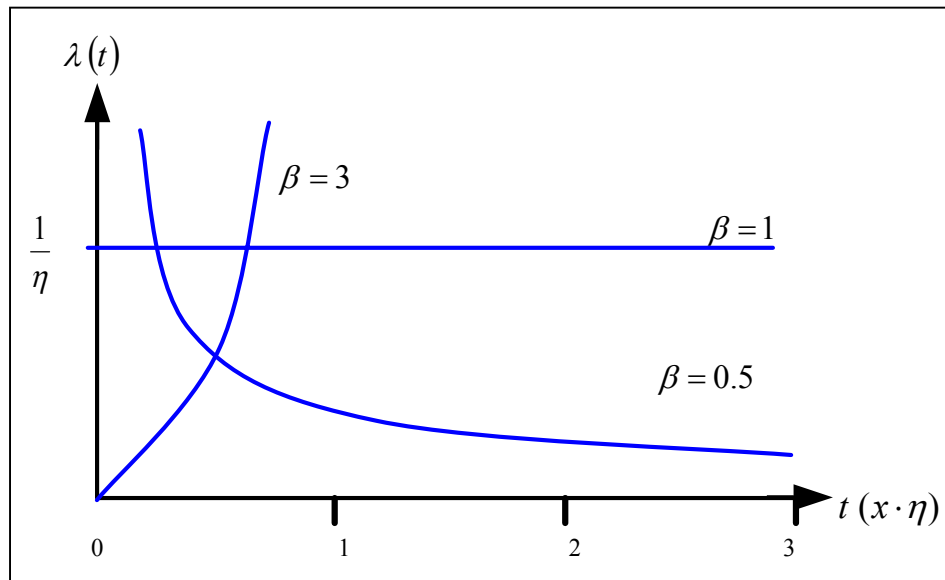


### 3.6.3 Función de Tasa de Falla $\lambda(t)$

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

Ecuación. 14 Función de Tasa de Fallas para la Distribución Weibull

Figura. 23 Función de Tasa de Fallas para la Distribución Weibull



#### **4. MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD MCC O RELIABILITY CENTRED MAINTENANCE RCM**

Es un proceso que se usa para determinar los requerimientos del mantenimiento de los elementos físicos en su contexto operacional. Una definición más amplia de RCM podría ser un proceso que se usa para determinar lo que debe hacerse para asegurar que un elemento físico continúe desempeñando las funciones deseadas en su contexto operacional presente.

El RCM se centra en la relación entre la organización y los elementos físicos que la componen. Antes de que se pueda explorar esta relación detalladamente, se necesita saber qué tipo de elementos físicos existentes en la empresa, y decidir cuáles son las que deben estar sujetas al proceso de revisión del RCM. En la mayoría de los casos, esto significa que se debe de realizar un registro de equipos completo si no existe ya uno.

Más adelante, RCM hace una serie de preguntas acerca de cada uno de los elementos seleccionados, como sigue:

¿Cuáles son las funciones?

¿De qué forma puede fallar?

¿Qué causa que falle?

- ¿Qué sucede cuando falla?
- ¿Qué ocurre si falla?
- ¿Qué se puede hacer para prevenir las fallas?
- ¿Qué sucede si no puede prevenirse la falla?

## **4.1 PROCESO DEL RCM.**

### **4.1.1 Funciones y Estándares de Funcionamiento**

Cada elemento de los equipos debe de haberse adquirido para unos propósitos determinados. En otras palabras, deberá tener una función o funciones específicas. La pérdida total o parcial de estas funciones afecta a la organización en cierta manera. La influencia total sobre la organización depende de la función de los equipos en su contexto operacional. Como resultado de esto el proceso de RCM comienza definiendo las funciones y los estándares de comportamiento funcional asociados a cada elemento de los equipos en su contexto operacional. Cuando se establece el funcionamiento deseado de cada elemento, el RCM pone un gran énfasis en la necesidad de cuantificar los estándares de funcionamiento siempre que sea posible. Estos estándares se extienden a la producción, calidad del producto, servicio al cliente, problemas del medio ambiente, costo operacional y seguridad.

### **4.1.2 Fallas Funcionales**

Una vez que las funciones y los estándares de funcionamiento de cada equipo se hayan definido, el paso siguiente es identificar cómo puede fallar cada elemento en la realización de sus funciones. Esto lleva al concepto de una falla funcional, que se define como la incapacidad de un elemento o

componente de un equipo para satisfacer un estándar de funcionamiento deseado.

#### **4.1.3 Modos de Falla (Causas de Falla)**

El paso siguiente es tratar de identificar los modos de falla que tienen más posibilidad de causar la pérdida de una función. Esto permite comprender exactamente qué es lo que puede que se esté tratando de prevenir. Cuando se está realizando este paso, es importante identificar cuál es la causa origen de cada falla.

#### **4.1.4 Efectos de las Fallas**

Cuando se identifica cada modo de falla, los efectos de las fallas también deben registrarse (en otras palabras, lo que pasaría si ocurriera). Este paso permite decidir la importancia de cada falla, y por lo tanto qué nivel de mantenimiento (si lo hubiera) sería necesario.

#### **4.1.5 Consecuencias de las Fallas**

Una vez que se hayan determinado las funciones, las fallas funcionales, los modos de falla y los efectos de los mismos en cada elemento significativo, el próximo paso en el proceso del RCM es preguntar cómo y (cuánto) importa cada falla. La razón de esto es porque las consecuencias de cada falla dicen si se necesita tratar de prevenirlos. Si la respuesta es positiva, también sugieren con qué esfuerzo debemos tratar de encontrar Las fallas.

## **4.2 DESARROLLO DE LOS CONCEPTOS DE: CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y DISPONIBILIDAD**

### **4.2.1 Concepto de Confiabilidad**

La probabilidad de que un equipo desempeñe satisfactoriamente las funciones para las que fue diseñado, durante el período de tiempo especificado y bajo las condiciones de operación dadas se define como confiabilidad.

La definición muestra que existen cuatro características específicas de la confiabilidad: probabilidad, desempeño satisfactorio, período de tiempo especificado y condiciones de operación dadas:

### **4.2.2 Concepto De Probabilidad**

Es la expresión que representa una fracción o un porcentaje que significa el número de veces que ocurre un evento, dividido por el número total de intentos.

“La probabilidad no es necesaria utilizarla en casos especiales para determinar la confiabilidad, como cuando se sabe que la confiabilidad es perfecta (el equipo nunca va a fallar) o es cero (cuando el equipo nunca va a funcionar). Para propósitos prácticos un martillo puede ser 100% confiable si se usa para clavar puntillas, pero puede tener confiabilidad cero si se utiliza para detener un tren; si se emplea para quebrar rocas la confiabilidad puede variar entre 0 y 100”<sup>9</sup>

<sup>9</sup> Toro Juan y Céspedes Pedro. *Metodología para medir Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad en Mantenimiento- Trabajo de Grado.*

➤ **Desempeño satisfactorio**

Es el segundo elemento en la definición de confiabilidad, indica que criterios específicos deben ser establecidos para describir lo que es considerado como una operación satisfactoria. El desempeño satisfactorio de un equipo implica conocer cuándo éste falla y ya no se está desempeñando satisfactoriamente.

➤ **Período de tiempo**

Debe ser plenamente identificado, por ejemplo el intervalo de tiempo puede estar basado en el calendario, en las horas de operación, en ciclos o incluso en otras.

➤ **Condiciones de operación dadas**

Son las que se espera que el equipo funcione, constituyen el cuarto elemento significativo de la definición básica de confiabilidad. Estas condiciones incluyen factores como ubicación geográfica donde se espera que el equipo opere, el medio ambiente, vibraciones, transporte, almacenamiento, empaque, etc.

Los factores anteriores no sólo se analizan en el momento de operación del equipo, sino también en condiciones en que el sistema está almacenado o está siendo transportado de un lugar a otro. La experiencia indica que el empaque, el almacenamiento y el transporte son algunas veces más críticos para la confiabilidad, que las condiciones mismas experimentadas durante su operación.



### **4.2.3 Concepto de Mantenibilidad.**

La mantenibilidad de un equipo es la probabilidad de que un dispositivo sea devuelto a un estado en el que pueda cumplir su misión en un tiempo dado, luego de la aparición de una falla y cuando el mantenimiento es realizado en un determinado período de tiempo, al nivel deseado de confianza, con el personal especificado, las habilidades necesarias, el equipo indicado, los datos técnicos, manuales de operación y mantenimiento, el departamento de soporte de mantenimiento y bajo las condiciones ambientales especificadas.

### **4.2.4Concepto de Disponibilidad**

La probabilidad de que el equipo esté operando satisfactoriamente en el momento en que sea requerido después del comienzo de su operación, cuando se usa bajo condiciones estables, donde el tiempo total considerado incluye el tiempo de operación, tiempo activo de reparación, tiempo inactivo, tiempo en mantenimiento preventivo (en algunos casos), tiempo administrativo y tiempo logístico se define disponibilidad. La disponibilidad es una característica que resume cuantitativamente el perfil de funcionabilidad de un equipo. La mayoría de los usuarios aseguran que necesitan la disponibilidad de un equipo tanto como la seguridad. Hay varios métodos para lograrlo, uno es construir un equipo que cuando falle sea fácil de recuperar, y el segundo es construir los equipos confiables, y por lo tanto, demasiado costosos que nadie los compraría.

### 4.3 DIAGRAMA DE BLOQUES DE CONFIABILIDAD

Los diagramas de bloques de confiabilidad es una de las herramientas que facilitan el modelamiento y simulación de la confiabilidad de sistemas y nos determinan como afectan los efectos de las fallas de los diferentes componentes en el desempeño de los sistemas.

Este diagrama define la dependencia o independencia secuencial de todas las funciones de un sistema para cada evento del ciclo de vida.

Aspectos a tener en cuenta en un diagrama de bloque:

- ♦ Define la lógica de interacción de fallas dentro de un sistema
- ♦ Cada bloque representa (componentes o subsistemas) que pueden fallar y al hacerlo pueden ocasionar o no la falla del sistema bajo análisis.
- ♦ El comportamiento de confiabilidad de cada bloque puede ser descrito en un diagrama de jerarquía inferior.
- ♦ Se modela el flujo a través de la red.
- ♦ El éxito de la función exige por lo menos un camino acertado entre los nodos de entrada y salida.
- ♦ Para cada bloque del diagrama general se debe calcular su confiabilidad  $R(t)$  en función de la rata de falla y de la densidad de falla.

Si tenemos un modo de falla repentino en el sistema se dice que se tiene un sistema de bloques de confiabilidad compuesto por bloques en serie, y si tenemos un modo de falla abierto en el sistema se dice que se tiene un sistema de bloques de confiabilidad compuesto por bloques en paralelo.

### 4.3.1 Diagrama De Bloques En Serie

En la configuración de un diagrama de bloques en serie (ver fig.24) cuando falla cualquier componente fallara el sistema completo. Por consiguiente para el éxito funcional de un sistema en serie, todos los componentes deberán funcionar con éxito durante el tiempo de disponibilidad deseada.

Figura. 24 Diagrama en Serie



Si se conoce la confiabilidad de los bloques individuales  $R_1, R_2, \dots, R_n$  la confiabilidad del sistema es:

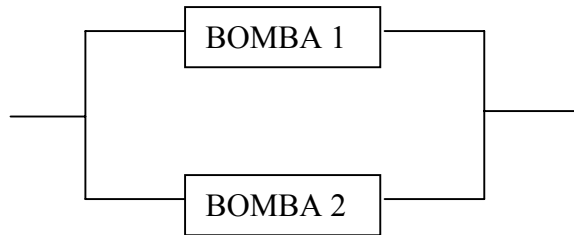
$$R(s) = R_1 \times R_2 \times R_3 \times \dots \times R_n$$

Cuando uno de los componentes individuales falla, entonces falla todo el sistema.

### 4.3.2. Diagrama De Bloques En Paralelo

La configuración de un diagrama de bloques en paralelo (ver Fig. 25) se da cuando la falla de todos los componente del sistema resulta en falla del sistema. Por consiguiente, para un sistema en paralelo, el éxito de solamente un componente puede ser suficiente para garantizar el éxito del sistema para el tiempo de disponibilidad deseado del sistema.

**Figura. 25 Diagrama en Paralelo**



La confiabilidad del sistema en paralelo es:

$$R(s) = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3) \dots (1 - R_n).$$

#### **4.4 DESARROLLO DE INDICADORES DE CONFIABILIDAD**

La gerencia de mantenimiento está sustituyendo los viejos valores por paradigmas de excelencia de mayor nivel. La práctica de ingeniería de confiabilidad, la medición de los indicadores y la gestión de la disponibilidad; así como la reducción de los costos de mantenimiento constituyen los objetivos primordiales de la empresa enfocados a asegurar la calidad de gestión de la organización de mantenimiento.

Los indicadores de mantenimiento que permiten evaluar el comportamiento operacional de las instalaciones, sistemas, equipos, dispositivos y componentes son:

- Tiempo Promedio entre Fallos (TMEF)-Mean time between Failures (MTBF).
- Tiempo Promedio para Reparar (TPPR)-Mean time To Repair (MTTR).
- Disponibilidad.
- Confiabilidad.

#### **4.4.1 Tiempo Medio entre Fallas (TMEF)-Mean time Between Failures (MTBF).**

El tiempo promedio entre fallos indica el intervalo de tiempo más probable entre un arranque y la aparición de un fallo; es decir, es el tiempo medio transcurrido hasta la llegada del fallo. Mientras mayor sea su valor, mayor es la confiabilidad del componente o equipo. El **MTBF** debe ser tomado como un indicador que represente de alguna manera el comportamiento de un equipo específico. Asimismo, para determinar el valor de este indicador se deberá utilizar la data primaria histórica almacenada en los sistemas de información.

El análisis de fallos es el paso más importante en la determinación de un programa de mantenimiento óptimo y éste depende del conocimiento del índice de fallos de un equipo en cualquier momento de su vida útil.

#### **4.4.2 Tiempo Promedio para Reparar (TPPR)-Mean Time To Repair (MTTR).**

Es la medida de la distribución del tiempo de reparación de un equipo o sistema. Este indicador mide la efectividad en restituir la unidad a condiciones óptimas de operación una vez que la unidad se encuentra fuera de servicio por un fallo, dentro de un periodo de tiempo determinado. El **MTTR** es un parámetro de medición asociado a la mantenibilidad, es decir, a la ejecución del mantenimiento. La mantenibilidad, definida como la probabilidad de devolver el equipo a condiciones operativas en un cierto tiempo utilizando procedimientos prescritos, es una función del diseño del equipo (factores tales como accesibilidad, modularidad, estandarización y facilidades de diagnósticos, facilitan enormemente el mantenimiento). Para

un diseño dado, si las reparaciones se realizan con personal calificado y con herramientas, documentación y procedimientos prescritos, el tiempo de reparación depende de la naturaleza del fallo y de las mencionadas características de diseño.

#### **4.4.3 Disponibilidad.**

Es una función que permite estimar en forma global el porcentaje de tiempo total en que se puede esperar que un equipo esté disponible para cumplir la función para la cual fue destinado. A través del estudio de los factores que influyen sobre la disponibilidad, el MTBF y el MTTR, es posible para la gerencia evaluar distintas alternativas de acción para lograr los aumentos necesarios de disponibilidad.

La disponibilidad se expresa como: 
$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

#### **4.4.4 Confiabilidad.**

Es la probabilidad de que un equipo cumpla una misión específica bajo condiciones de uso determinadas en un período dado. El estudio de confiabilidad es el estudio de fallos de un equipo o componente. Si se tiene un equipo sin fallo, se dice que el equipo es ciento por ciento confiable o que tiene una probabilidad de supervivencia igual a uno. Al realizar un análisis de confiabilidad a un equipo o sistema, obtenemos información valiosa acerca de la condición del mismo: probabilidad de fallo, tiempo promedio entre fallos, etapa de la vida en que se encuentra el equipo. El factor para predecir la confiabilidad de componentes, equipos o sistemas es la tasa de fallos la cual se expresa en función de densidad de probabilidad o (pdf).

## 5. ANALISIS DE CONFIABILIDAD

### 5.1 CALCULO DE INDICADORES DE MANTENIMIENTO

Los datos analizados comprenden la ocurrencia de la falla y su reparación de las bombas en cada estación de bombeo. Los registros de fallas comprenden desde el 22 de abril de 2000 al 14 de noviembre de 2003. Los tiempos de reparaciones por componentes no están discriminados.

Observando las fallas por estaciones de bombeo, la estación más crítica por su tamaño y función a desempeñar dentro del sistema es la estación norte, en la cual centramos nuestro análisis (ver anexo A) fallas por estación.

**TABLA 5. TASA DE FALLA DE LA ESTACION NORTE POR BOMBAS  
BOMBA N° 1**

N°	Días de Falla	Percentil %
1	10	9.0
2	12	18.18
3	19	27.27
4	33	36.36
5	65	45.45
6	66	54.54
7	97	63.63
8	105	72.72
9	130	81.81
10	158	90.9

### BOMBA N° 2

N°	Días de Falla	Percentil %
1	13	14.28
2	57	28.57
3	97	42.85
4	155	57.14
5	155	71.42
6	160	85.71

### BOMBA N° 3

N°	Días de Falla	Percentil %
1	19	20.0
2	91	40.0
3	115	60.0
4	158	80.0

### BOMBA N° 4

N°	Días de Falla	Percentil %
1	17	11.11
2	23	22.22
3	57	33.33
4	85	44.44
5	91	55.55
6	157	66.66
7	320	77.77
8	354	88.88

### BOMBA N° 5

N°	Días de Falla	Percentil %
1	66	14.28
2	128	28.57
3	169	42.85
4	201	57.14
5	249	71.42
6	364	85.71



**TABLA 6. TASA DE REPARACIÓN DE LA ESTACION NORTE POR BOMBAS.**

**BOMBA N° 1**

<b>N°</b>	<b>Tiempo Reparación (días)</b>	<b>Percentiles%</b>
1	0,75	8,33
2	0,75	16,66
3	0,75	25,00
4	1,5	33,30
5	4,5	41,66
6	9	50,00
7	9	58,30
8	6	66,60
9	12,5	75,00
10	12,5	82,30
11	12,5	91,60

**BOMBA N° 2**

<b>N°</b>	<b>Tiempo Reparación (días)</b>	<b>Percentiles%</b>
1	1	14,28
2	4,5	28,57
3	4,5	42,85
4	6	57,14
5	12	71,42
6	12	85,71

**BOMBA N° 3**

<b>N°</b>	<b>Tiempo Reparación (días)</b>	<b>Percentiles%</b>
1	0,55	16,66
2	0,75	33,34
3	1	50,00
4	1	66,00
5	1,5	83,30

**BOMBA N° 4**

<b>N°</b>	<b>Tiempo Reparación (días)</b>	<b>Percentiles%</b>
1	0,5	10,00
2	0,5	20,00
3	0,5	30,00
4	1	40,00
5	1	50,00
6	1,625	60,00
7	3	70,00
8	9	80,00
9	15	90,00

### BOMBA N° 5

N°	Tiempo Reparación (días)	Percentiles%
1	0,75	12,53
2	1,5	25,00
3	6	37,50
4	9	50,00
5	12,5	62,50
6	12,5	75,00
7	17,5	87,50

Tomando como referencia de tiempo medio entre falla o MTBF de 63% de las

fallas, dado que  $R = e^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)} \quad \left(\frac{t}{\lambda}\right)=0 \rightarrow R = \frac{1}{e} = 0,37$

Cuando la confiabilidad es del 37%, las fallas acumuladas son del 63% en este rango localizamos el MTBF.

La tasa de falla  $\lambda = \frac{1}{MTBF}$  sirve para el cálculo de la probabilidad de falla,

el MTBF se obtiene mediante iteración en el percentil 63%.

El MTTR también se obtiene mediante iteración en el percentil 63%.

Para nuestro estudio los cálculos se obtuvieron utilizando el software Weibull, el cual también presenta las curvas de confiabilidad (Ver anexo B).

Los indicadores de mantenimiento calculados son:

- MTBF para bombas, estación de bombeo y componentes de bombas.
- MTTR para bombas estación de bombeo, no se calcula para componentes por no tener la información.

- Disponibilidad de bombas y estación de bombeo.
- Confiabilidad de bombas, estación de bombeo y componentes de bombas.
- Se calcula la confiabilidad de la estación de bombeo de acuerdo a la entrada en funcionamiento de cada bomba para satisfacer el nivel de tanque.
- Tasa de falla típica según Weibull (ver anexo C).

**TABLA 7. INDICADORES POR BOMBAS**

	BOMBA # 1	BOMBA # 2	BOMBA # 3	BOMBA # 4	BOMBA # 5	BOMBA TÍPICA	ESTACION
$\beta$	1,1435	1,1576	1,1303	1,0097	1,8158	1,2	1,2323
<b>MTBF (DIAS)</b>	76,2074	124,4305	114,2576	143,644	226,8416	1458	125,3368
$\lambda$	0,0131	0,00803	0,00875	0,00696	0,004408	0,000685	0,00797
<b>MTTR (DIAS)</b>	6,7687	7,6916	1,0763	2,7518	9,5843	9	4,8879
<b>DISPONIBILIDAD%</b>	91,84	94,17	99,06	98,11	95,94	99,38	96,24
<b>R=95%</b>	5,67 Días	9,56 Días	8,25 Días	7,58 Días	44,19 Días	122,6 Días	11,25 Días
<b>R=90%</b>	10,64 Días	17,80 Días	15,60 Días	15,46 Días	65,68 Días	223,5 Días	20,18 Días
<b>R=85%</b>	15,55 Días	25,89 Días	22,87 Días	23,75 Días	83,39 Días	322,7 Días	28,69 Días
<b>R=80%</b>	20,52 Días	34,05 Días	30,30 Días	32,52 Días	99,30 Días	419,8 Días	37,10 Días
<b>R=75%</b>	25,63 Días	42,41 Días	37,94 Días	41,82 Días	114,21 Días	518 Días	45,60 Días
<b>R=70%</b>	30,93 Días	51,06 Días	45,89 Días	51,74 Días	128,57 Días	619,6 Días	54,29 Días
<b>FALLOS/AÑO</b>	4,72	2,89	3,15	2,5	1,58	0,2503	2,872
<b>TOTAL FALLOS DE 5 BOMBAS AL AÑO</b>						1,2515	14,86
<b>REPARACION DIAS/AÑO</b>	31,974	22,252	3,391	6,921	15,21	45	79,74

La tabla 7, de indicadores por bomba contiene el MTBF, el MTTR, la disponibilidad, los días de operación a determinada confiabilidad, la tasa de falla y ellos indican que las bombas y la estación de bombeo presentan:

- Un  $1 < \beta < 2$ , lo cual es característico de tasa de falla creciente y ubicado en la curva de la bañera en zona de desgaste, la vida útil de una bomba es de 15 a 20 años.

- La bomba 4,  $\beta=1,0097$  está en vida útil.
- El MTBF es del 10% del de una bomba típica, muy baja indicando un pobre mantenimiento.
- $\lambda$  indica una tasa de falla muy superior a una bomba típica.
- El MTTR es bueno en promedio, pero las acciones de mantenimiento no son muy efectivas por la alta tasa de falla, estos días se toman con ocho (8) horas de trabajo.
- La disponibilidad es buena, pero la confiabilidad no tanto.
- Los días de operación a determinada confiabilidad son demasiados bajos, una bomba típica con una  $R = 95\%$ , tiene una probabilidad de operar 122,5 días comparada con la de mayor valor  $B_5$  con 44,19 días.
- Las fallas al año no deben mayores de 1,25 para las cinco (5) bombas, tenemos 14,86 en la estación norte.
- Los días de reparación no deben ser mayores de 9, tenemos en promedio cinco (5) días.
- Por ningún motivo debe haber un vertimiento de la estación de bombeo, los estudios arrojan la probabilidad de dos (2) vertimientos al año.

**TABLA 8. CONFIABILIDAD POR BOMBAS A t DIAS**

	R<30 DIAS	R<60 DIAS	R<90 DIAS	R<120 DIAS	R<150 DIAS	R<180 DIAS
<b>BOMBA # 1</b>	0,7087	0,4673	0,2983			
<b>BOMBA # 2</b>	0,8247	0,6506	0,5029	0,3833		
<b>BOMBA # 3</b>	0,8021	0,617	0,466	0,3475		
<b>BOMBA # 4</b>	0,8041	0,6609	0,536	0,4343	0,3518	
<b>BOMBA # 5</b>	0,9749	0,9146	0,8294	0,73	0,6238	0,5184
<b>BOMBA TIPICA</b>	0,996	0,978	0,9653	0,9513	0,9368	0,922

La tabla 8. Indica que la confiabilidad de las bombas es mucho menor, comparada con una típica presenta una diferencia notable después de sesenta (60) días de operación, excepto la bomba N° 5 que es la que tiene mejor confiabilidad.

**TABLA 9. CONFIABILIDAD A DIFERENTES NIVELES DEL TANQUE**

NIVEL	BOMBAS	R<30 DIAS	R<30 DIAS TIPICA	R<60 DIAS	R<60 DIAS TIPICA	R<90 DIAS	R<90 DIAS TIPICA
<b>1,5 mt</b>	B1	0,7087	0,996	0,4673	0,978	0,2983	0,9653
<b>2 mt</b>	B1*B5	0,6909	0,992	0,4273	0,956	0,2474	0,9318
<b>2,5mt</b>	B1*B5*B3	0,5541	0,988	0,2636	0,935	0,115	0,8994
<b>3mt</b>	B1*B5*B3*B2	0,457	0,984	0,1715	0,914	0,057	0,8682
<b>3,5mt</b>	B1*B5*B3*B2*B4	0,3674	0,98	0,0919	0,8947	0,031	0,8381

Dado que las bombas entran en operación de acuerdo a los niveles del tanque, ellos trabajan en serie y la confiabilidad baja drásticamente a medida que aumentan los niveles del tanque de almacenamiento.

La confiabilidad de la estación debe ser cercana al 98%, comparado con un 36% de confiabilidad en 30 días de operación, a horas pico ver tabla 9.

La tabla 10. muestra los tiempos de fallos por componentes.

Como se muestra en la tabla 11. Indicadores por componentes, las tasas de fallo por componentes son muy superiores comparados con los componentes típicos, lo que indica malas acciones de mantenimiento

**TABLA 10. TIEMPO DE FALLOS POR COMPONENTES**

<b>MOTOR</b>		
<b>Nº</b>	<b>Tiempo Fallo (días)</b>	<b>Percentiles %</b>
1	23	11,11
2	95	22,22
3	173	33,33
4	201	44,44
5	256	55,55
6	307	66,66
7	340	77,77
8	488	88,88

<b>SELLOS MECANICOS</b>		
<b>Nº</b>	<b>Tiempo Fallo (días)</b>	<b>Percentiles %</b>
1	10	7,69
2	66	15,38
3	76	23,07
4	95	30,76
5	130	38,76
6	147	46,15
7	167	53,84
8	169	61,53
9	201	69,23
10	310	76,92
11	315	84,61
12	340	92,3

<b>RODAMIENTOS</b>		
<b>Nº</b>	<b>Tiempo Fallo (días)</b>	<b>Percentiles %</b>
1	12	14,28
2	56	28,57
3	95	42,85
4	105	57,14
5	169	71,42
6	201	85,71

<b>IMPULSOR</b>		
<b>Nº</b>	<b>Tiempo Fallo (días)</b>	<b>Percentiles %</b>
1	188	16,66
2	213	33,33
3	388	50
4	1177	66,66
5	1177	83,33

<b>TORNILLO DE AJUSTE DEL IMPULSOR</b>		
<b>Nº</b>	<b>Tiempo Fallo (días)</b>	<b>Percentiles %</b>
1	9	14,28
2	68	28,57
3	225	42,85
4	656	57,14
5	746	71,42
6	845	85,71

<b>HERMETICIDAD</b>		
<b>Nº</b>	<b>Tiempo Fallo (días)</b>	<b>Percentiles %</b>
1	17	11,11
2	17	22,22
3	57	33,33
4	214	44,44
5	242	55,55
6	320	66,66
7	857	77,77
8	1177	88,88

TABLA 11. INDICADORES POR COMPONENTES						
INDICADOR	MOTOR	SELLOS MECANICO	RODAMIENTO	IMPULSOR	TORNILLO DE AJUSTE IMPULSOR	HERMETICIDAD
$\beta$	1,1804	1,235	1,075	1,2649	0,6144	0,6973
$\beta$ TÍPICO	1,2	1,400	1,300	1,5	1,1	1,2
MTBF (DIAS)	274,75	194,77	124,53	684,32	443,41	316,633
MTBF(DIAS)TÍPICO	4166,6	1041,66	6.250,00	2083,3	833,3	
$\lambda$	0,00363	0,00513	0,00803	0,00146	0,00225	0,00315
$\lambda$ TÍPICO	0,00024	0,00096	0,006	0,00016	0,00048	0,0012
FALLOS/AÑO	1,31	1,84	2,89	0,526	0,8118	1,1369
FALLOS/AÑO TÍPICA	0,0876	0,35	0,219	0,0584	0,1752	0,438
FALLOS/AÑO PARA 5 BOMBAS	6,55	9,2	14,45	2,63	4,059	5,684
FALLOS/AÑO PARA 5 BOMBAS TÍPICA	0,438 Días	1,752 Días	1,095 Días	0,292	0,876	2,19

DÍAS DE OPERACIÓN A DIFERENTE CONFIABILIDAD						
R=95%	22,19 Días	17,56 Días	7,8673 Días	65,379 Días	3,5269 Días	4,481 Días
R=90%	40,83 Días	31,47 Días	15,364 Días	115,504 Días	11,381 Días	12,576 Días
R=85%	58,94 Días	44,71 Días	22,989 Días	162,707 Días	23,042 Días	23,408 Días
R=80%	77,1 Días	57,79 Días	30,871 Días	209,053 Días	38,602 Días	36,875 Días
R=75%	95,62 Días	71 Días	39,097 Días	255,554 Días	58,3682 Días	53,075 Días
R=70%	114,72 Días	84,5 Días	47,748 Días	302,895 Días	82,817 Días	72,232 Días



Comparando la confiabilidad de los componentes de las bombas, con los componentes de una bomba típica se observa que después de sesenta (60) días de operación, la probabilidad de fallar es mayor del 20%, lo que indica acciones de mantenimientos no mayores a ese tiempo. Excepto para el impulsor que puede ser de ciento ochenta (180) días. (Ver Tabla 12.)

**TABLA 12. CONFIABILIDAD POR COMPONENTE A t DIAS**

<b>COMPONENTE</b>	<b>R&lt;30 DIAS</b>	<b>R&lt;60 DIAS</b>	<b>R&lt;90 DIAS</b>	<b>R&lt;120 DIAS</b>	<b>R&lt;150 DIAS</b>	<b>R&lt;180 DIAS</b>
<b>MOTOR</b>	0,9294	0,8471	0,765	0,6865	0,613	0,545
<b>MOTOR TIPICO</b>	0,9973	0,9938	0,99	0,9859	0,9816	0,9772
<b>SELLO MECANICO</b>	0,9055	0,7916	0,6801	0,577	0,4846	0,4037
<b>SELLO MECANICO TIPICO</b>	0,993	0,9817	0,968	0,9526	0,9358	0,9179
<b>RODAMIENTO</b>	0,8054	0,6338	0,494	0,3825	0,2948	0,2262
<b>RODAMIENTO TIPICO</b>	0,9946	0,9868	0,9777	0,9678	0,9572	0,9461
<b>IMPULSOR</b>	0,981	0,955	0,926	0,8953	0,8336	0,8314
<b>IMPULSOR TIPICO</b>	0,9996	0,999	0,9982	0,9973	0,9962	0,9951
<b>TORNILLO AJUSTE DEL IMPULSOR</b>	0,826	0,7463	0,687	0,6389	0,5982	0,5629
<b>TORNILLO AJUSTE DEL IMPULSOR TIPICO</b>	0,9906	0,98	0,9689	0,9576	0,9461	0,9346
<b>HERMETICIDAD</b>	0,8243	0,731	0,6598	0,6061	0,5522	0,5095
<b>HERMETICIDAD TIPICO</b>	0,9816	0,9583	0,9331	0,9068	0,88	0,853

Para las cinco (5) bombas las fallas por componentes al año son de 42,573 fallas/año y son generados por el 34,9% de los modos de falla que equivalen a 14,8608 fallas/año, y estos son:

- Falla en los rodamientos
- Falla en los motores
- Falla en los sellos mecánicos
- Tornillos de ajuste del impulsor

Son debido a causas de fallas como:

- Problemas de voltaje, contactores y protectores.
- Problemas de hermeticidad, fuga, daños de aceites dieléctricos, daños en los rodamientos.
- Problemas debidos a sellos mecánicos producidos por exceso de arena.
- Problemas de vibraciones, turbulencia en la succión de la bomba.
- Elementos extraños que obstruyen la succión de la bomba.
- El mismo arreglo o ubicación de las bombas por la forma de entrar en funcionamiento a los diferentes niveles del tanque, ya que unos están operando a diferente altura de cabeza dinámica, los que la llevan a trabajar en un punto de operación no óptimo de presión y caudal.

Analizando todas las fallas en la estación norte, tenemos que el MTBF de la estación es 125,3368 días con  $\lambda = 0,00797$  falla/días.

Para cinco (5) bombas el  $\lambda = 2,87$  fallas/año, lo que quiere decir, que existe la probabilidad que hayan entre dos (2) o tres (3) vertimientos en el año por fallas de una o más bombas en un intervalo de tiempo de hora pico, que interrumpen la operación de la estación de bombeo.

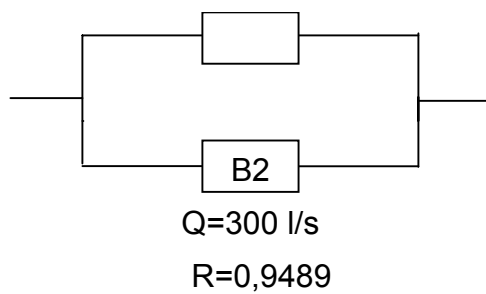
## **5.2 CONFIABILIDAD DE LA OPERACIÓN DE LA ESTACION DE BOMBEO NORTE**

El análisis se realizó para un tiempo de treinta (30) días como ejemplo del modelo centrado en confiabilidad, se estudio el sistema usado por la estación y se plantea el sistema de operación propuesto, dependiendo el nivel del tanque de almacenamiento.

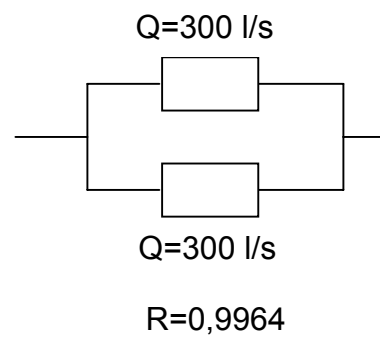
Tomamos que una bomba típica a treinta (30) días de operación tiene  $R=0,975$ .

1. Operación a 1,5 Mts de nivel del tanque,  $Q = 300$  Lts/Seg.

**Sistema Usado**



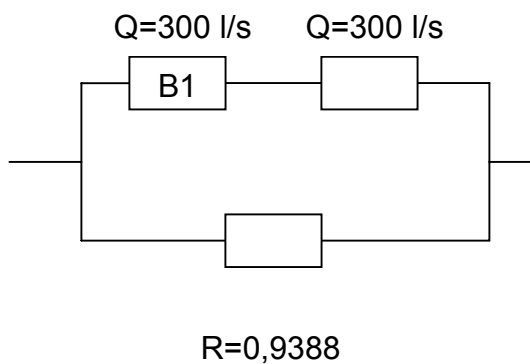
**Sistema propuesto**



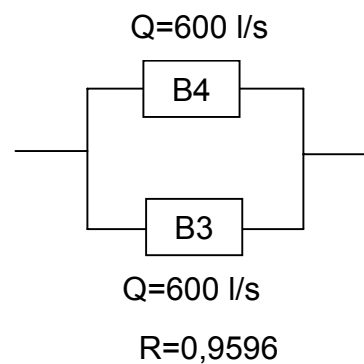
Representando un aumento del 5%

2. Operación a 2 Mts del nivel del tanque,  $Q = 900$  Lts/Seg.

**Sistema Usado**



**Sistema Propuesto**

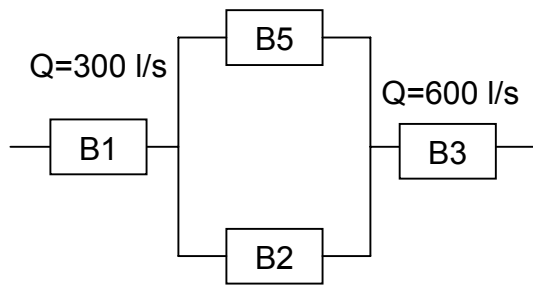


Representando un aumento del 2%.

3. Operación a 2,5 Mts del nivel del tanque

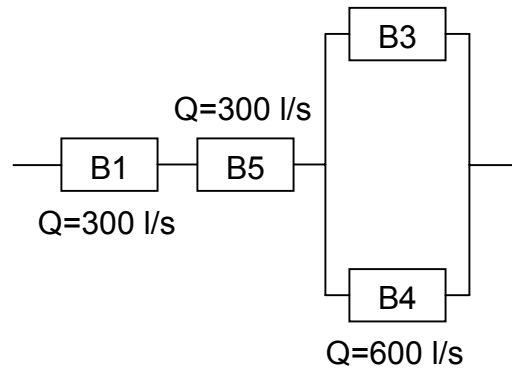
Q = 1.200 Lts/Seg.

**Sistema Usado**



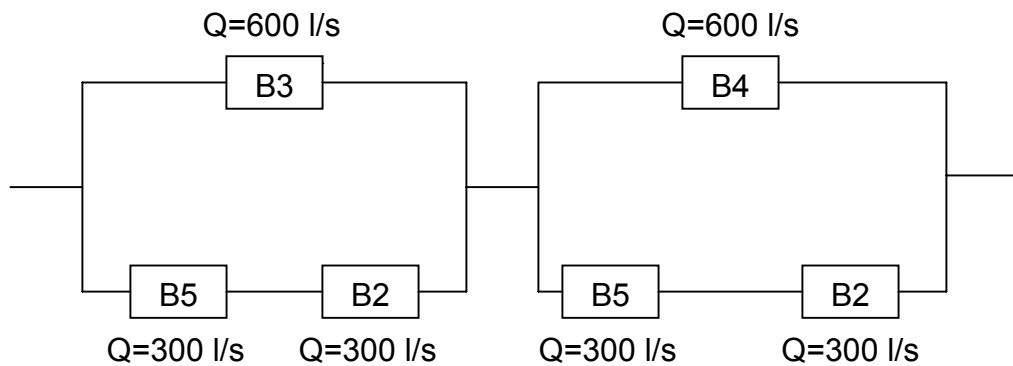
R = 0,5664

**Sistema Usado**



R = 0,6629

**Sistema Propuesto**



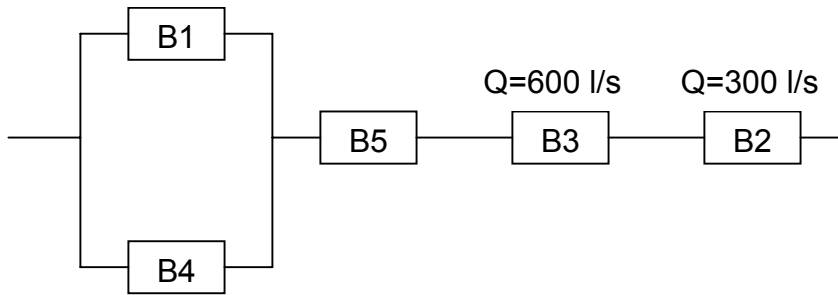
B3, B4 en serie y como respaldo de ambas B5, B2

R = 0,9243

Representando un aumento del 25%.

4. Operación a 3 Mts del nivel del tanque,  $Q = 1.500 \text{ Lts/Seg.}$

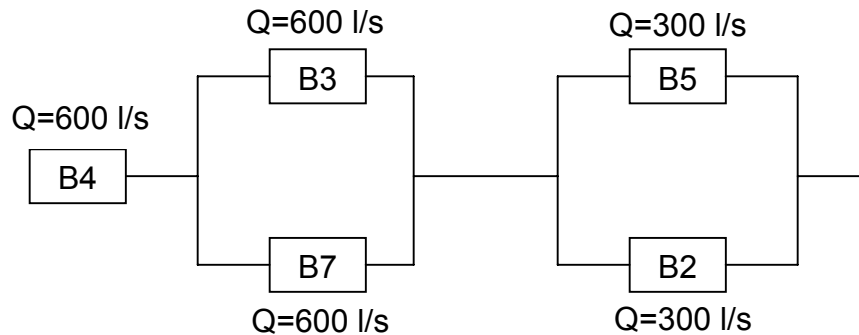
**Sistema Usado**



$B_1$ como respaldo de $B_4$	$R = 0,6080$
$B_4$ como respaldo de $B_2$	$R = 0,5942$
$B_3$ como respaldo de $B_4$	$R = 0,5477$
$B_4$ como respaldo de $B_5$	$R = 0,5179$

Para mejorar la confiabilidad en un nivel de 3 Mts del tanque, recomendamos incluir una bomba de 600 Lts/Seg., y operar con un sistema como este:

**Sistema Recomendado**

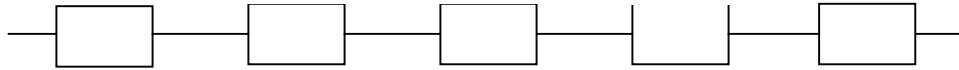


$B_7$ como respaldo de $B_3$ y $B_2$ como respaldo de $B_5$	$R = 0,797$
$B_7$ como respaldo de $B_4$ y $B_2$ como respaldo de $B_5$	$R = 0,794$

Representando un aumento del 20%.

5. Operación a 3,5 Mts del nivel del tanque  $Q = 2.100 \text{ Lts/Seg.}$

### Sistema Usado

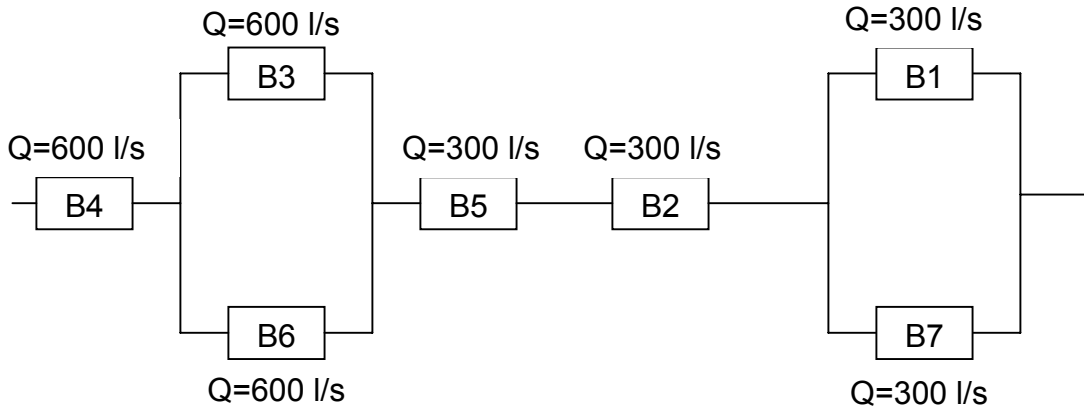


$$R = 0,3674$$

No hay bomba de respaldo

Para mejorar la confiabilidad en un nivel de 3,5 Mts del tanque recomendamos incluir 1 bomba de 300 Lts/Seg., y operara con un sistema como este:

### Sistema Recomendado



$B_1$ como respaldo de $B_7$ y $B_3$ como respaldo de $B_6$	$R = 0,6450$
$B_1$ como respaldo de $B_7$ y $B_4$ como respaldo de $B_6$	$R = 0,6435$
$B_2$ como respaldo de $B_7$ y $B_3$ como respaldo de $B_6$	$R = 0,5504$
$B_2$ como respaldo de $B_7$ y $B_4$ como respaldo de $B_6$	$R = 0,5491$
$B_5$ como respaldo de $B_7$ y $B_3$ como respaldo de $B_6$	$R = 0,4673$
$B_5$ como respaldo de $B_7$ y $B_4$ como respaldo de $B_6$	$R = 0,4662$

La confiabilidad del sistema sigue siendo baja, para un sistema como el usado, con bombas típicas y sin respaldo en treinta (30) días de operación  $R=0,899$

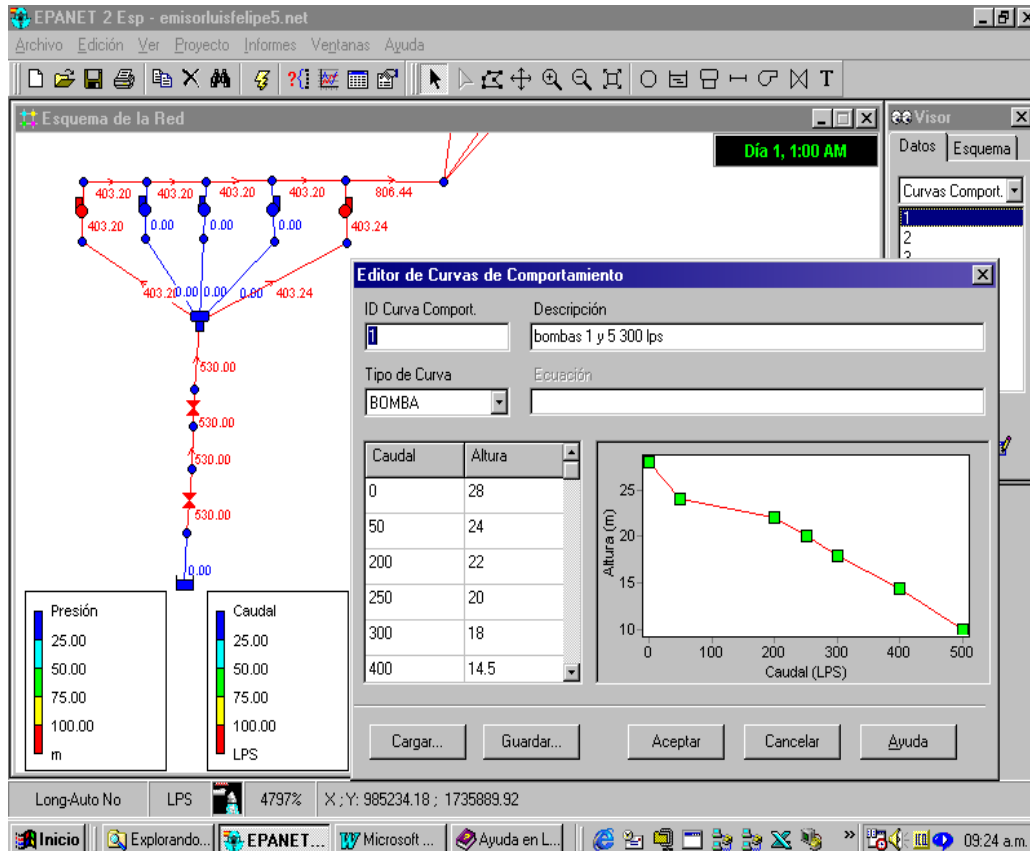
- Otro sistema recomendado es incluir una (1) bombas de 1.500 Lts/Seg., como respaldo de las cinco (5) bombas utilizadas actualmente obteniéndose una confiabilidad del sistema de  $R = 0,98$
- Otro sistema recomendado es utilizar dos (2) bombas de 1.500 Lts/Seg. Una como respaldo de la otra, obteniéndose una confiabilidad del sistema de  $R = 0,99$

### **5.2.1 Análisis del Diseño Actual Mediante Simulación Hidráulica con el Software Epanet 2.0**

EPANET es un software permite realizar simulaciones en periodos prolongados (uno o varios días) del comportamiento hidráulico y de la evolución de la calidad del agua en redes de suministro a presión. Una red puede estar constituida por tuberías, nudos (uniones de tuberías), bombas, válvulas y depósitos de almacenamiento o embalses. EPANET efectúa un seguimiento de la evolución de los caudales en las tuberías, las presiones en los nudos, los niveles en los depósitos.

Para la simulación es necesario insertar las curvas características de cada una de las unidades de bombeo.

**Figura. 26 Simulación Software Epanet 2.0**



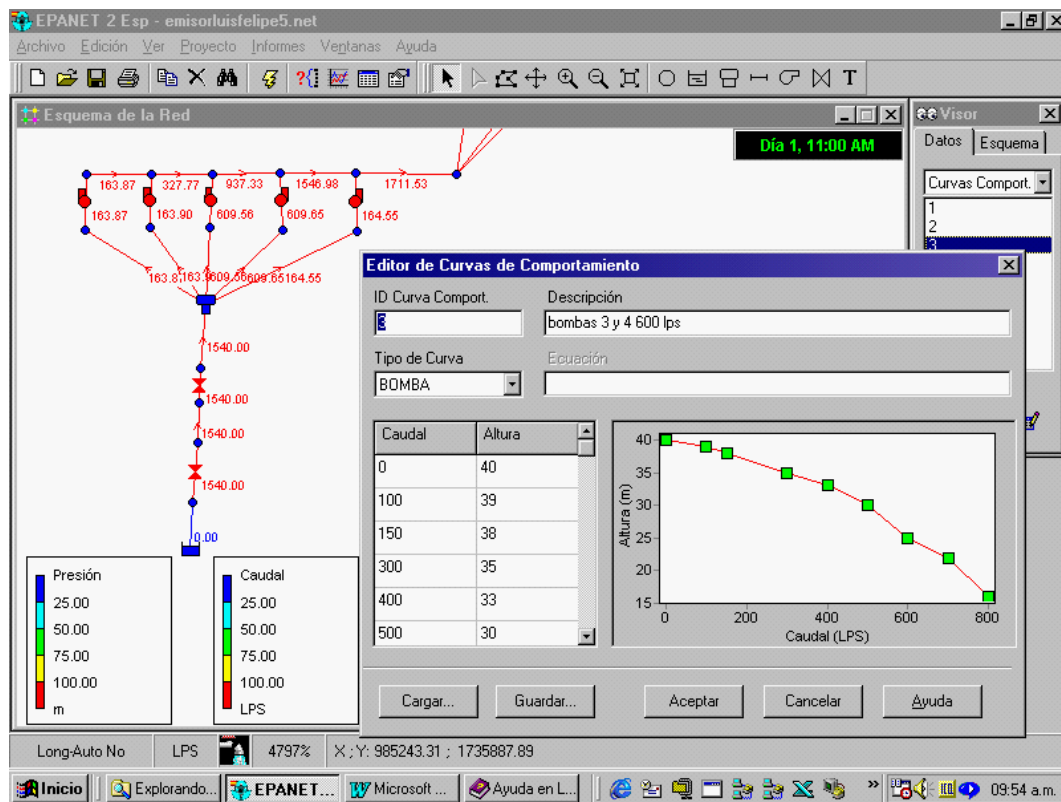
Se puede apreciar que al encontrarse el nivel del tanque en 2 mts y estando en funcionamiento las bombas 1 y 5, Según la curva el punto de máxima eficiencia se localiza a 300 l/seg y una altura de 16 mts para cada bomba, al tenerse en disposición hidráulica en paralelo se espera un promedio inferior a los 600 l/s con la misma cabeza pero como las perdidas por fricción con bajos regimenes de flujo son bajas el punto de operación del sistema de bombeo se corre hacia la derecha ocasionando perdidas de eficiencia en el equipo, aumento en los amperajes del motor que conducen a su vez a tratar de estrangular las válvulas en la descarga, generando una disminución en los caudales de salida. Lo que conduce a un aumento en el nivel del tanque



generando incremento de la cabeza estática que a su vez ocasiona desplazamiento nuevamente de la operación.

Cuando se encuentran en operación las cinco unidades de bombeo, las bombas con capacidad nominal de 300 l/s incurren en un nuevo punto de operación, ya que su altura dinámica no es capaz de vencer la de las bombas de 600 l/s ocasionando ahora un desplazamiento en la curva característica hacia el lado izquierdo reduciendo considerablemente los caudales de salida de cada una de las bombas de 300 l/s como se detalla en la figura 27:

**Figura. 27 Simulación Software Epanet 2.0 Trabajando (5) Bombas**



Los continuos desplazamientos en las curvas de operación del sistema de bombeo genera una reducción considerable en la vida útil del equipo causando entre otros desgaste en los impulsores, fallas en los sellos mecánicos, rodamientos y fatiga en los ejes.

Como Acciones preventivas a corto plazo se recomienda en primer lugar estudiar el diseño y la instalación de variadores de velocidad que trabajen con señales de control de nivel y de presión para buscar los ajustes necesarios en los ciclos de operación de cada una de las unidades de Bombeo.

Otra recomendación pensando en el incremento de la confiabilidad es operar la estación con una sola unidad de bombeo cuyo ciclo de trabajo estará demarcado dentro del desarrollo de su curva característica.

### 5.3 APLICACIÓN DEL RCM

#### Descripción del sistema

**FECHA:** 10 de Febrero de 2004

**PLANTA:** Estación de bombeo de aguas residuales- EBAR NORTE.

**SISTEMA:** Pretratamiento y disposición final de aguas residuales.

**SUBSISTEMA:** Bombeo de aguas residuales de la ciudad de Santa Marta.

**FUNCION PRINCIPAL:** Garantizar el funcionamiento normal e ininterrumpido de las aguas residuales de la ciudad de Santa Marta.

**FUNCIONES SECUNDARIAS:**

1. Efectuar el Pretratamiento de las aguas residuales a la llegada de la misma.
2. Garantizar que el agua bombeada al emisario submarino vaya con las condiciones ideales de presión y caudal para producir las condiciones propicias en la descarga.
3. Funcionar con la mayor estanqueidad posible para que no se presente ningún tipo de filtración a la Bahía de Santa Marta, ni al acuífero circundante.

**CARACTERISTICAS TECNICAS:**

La estación de bombeo de aguas residuales Norte, tiene una capacidad instalada de 2000 lts/seg y una altura dinámica de 20 mts, cuenta con cinco unidades de bombeo con las siguientes características:

- A. 2 Bombas Marca ABS AFP-4002 M1850/6-71,6 con motor de 250 Hp (Caudal bombeado por cada una de 600 l/seg)
- B. 2 Bombas Marca KSB KRT UK 300-395/756 con motor de 130 Hp (Caudal bombeado por cada una de 300 l/seg)
- C. 1 Bomba Marca ABS AFP 1100/6 W3GBL con motor de 150 Hp (Caudal bombeado de 300 l/seg)

**CONDICIONES OPERATIVAS:**

La estación de bombeo trabaja en forma automática de acuerdo a la entrada de agua residual que este llegando a los tanques de almacenamiento, para ello se encuentra instalado dos medidores de nivel en cada uno de los tanques, esta señal es enviada hasta un Plc, en el cual a través de una programación preestablecida se inicia el encendido de los equipos de acuerdo a los niveles que se encuentren censando; existe también la opción de operar la estación en modo manual, donde el operador de acuerdo a la medida de nivel que marquen los tanques hace el encendido de las unidades de bombeo. Estos equipos trabajan en paralelo hidráulicamente suministrando el caudal a un manifold principal cuyo diámetro es de un metro.

Si la estación no llega a bombear 1700 l/seg se rebosan los manholes dado que es ese el promedio de aguas residuales que llegan a la misma en horas pico.

**CONDICIONES AMBIENTALES:**

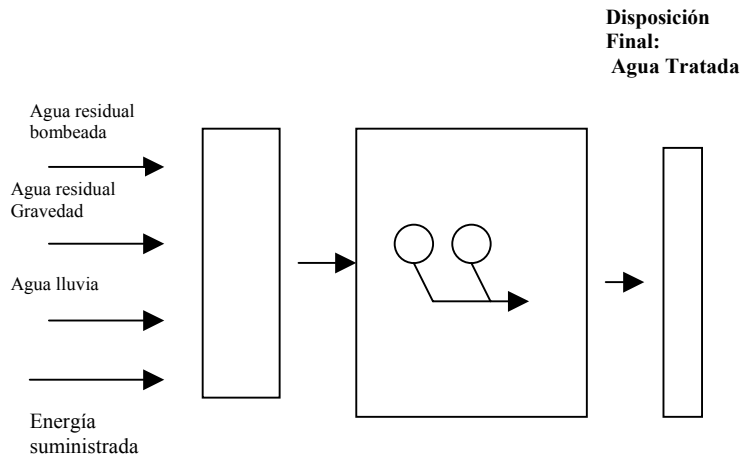
Como se esta tratando agua residual con muy poco oxigeno dado que esta en el punto mas bajo de la ciudad, es importante anotar que no es permitido ningún tipo de vertimiento por parte de la autoridad ambiental, aunque exista una línea de emergencia no puede ser usada por los cargos que generarían las sanciones; los gases que emite la estación son de un grado alto por la falta de oxigeno en el mismo.

**FRONTERAS:**

ENTRADAS : AGUA RESIDUAL PRETRATADA, LIBRE DE SOLIDOS DE GRAN TAMAÑO Y ARENAS  
ENERGIA SUMINISTRADA POR EL COMERCIALIZADOR  
ENERGIA SUMINISTRADA POR GENERACION PROPIA EN CASO DE AUSENCIA DE TENSION  
AGUAS LLUVIAS CUANDO SE PRESENTEN PRECIPITACIONES

SALIDAS: AGUA RESIDUAL BOMBEADA A 1700 L/S Y HDT DE 20 MTS DE COLUMNA DE AGUA.  
ESTAS CONDICIONES SERAN LAS NECESARIAS PARA GARANTIZAR UN CORRECTA DILUCION EN EL EMISARIO SUBMARINO.

**DIAGRAMA ESQUEMATICO: EBAR NORTE**



**ESTACION NORTE**



### 5.3.1 FUNCION –FALLA FUNCIONAL

<b>FECHA:</b> 20 de junio de 2003	
<b>PLANTA:</b> Estación de bombeo de aguas residuales- EBAR NORTE.	
<b>SISTEMA:</b> Pretratamiento y disposición final de aguas residuales.	
<b>SUBSISTEMA:</b> Bombeo de aguas residuales de la ciudad de Santa Marta	
<b>FUNCION</b>	<b>FALLA FUNCIONAL</b>
1. Bombear las aguas residuales con previo Pretratamiento a unas condiciones mínimas de 1700 l/seg y una altura dinámica total de 20 mts.	1. Ausencia total del bombeo 2. Bombear un flujo inferior a los 1700 l/seg y una cabeza inferior a 20 mts. 3. Presentarse problemas de estanqueidad contaminando el acuífero o la bahía de Santa Marta.

### 5.3.2 FALLA FUNCIONAL- MODO DE FALLA – EFECTOS DE LA FALLA

**FECHA:** 20 de junio de 2003

**PLANTA:** Estación de bombeo de aguas residuales- EBAR NORTE.

**SISTEMA:** Pretratamiento y disposición final de aguas residuales.

**SUBSISTEMA:** Bombeo de aguas residuales de la ciudad de Santa Marta

<b>FALLO FUNCIONAL</b>	<b>MODO DE FALLA</b>	<b>EFECTOS DE LA FALLA</b>
<p>1. Ausencia total del bombeo</p>	<p>1. Que los motores de todas las unidades fallen.</p> <p>2. Que la compuerta que permite el acceso a los tanques se caiga, evitando la entrada de agua a los mismos.</p> <p>3. Que el Plc que regula el control en modo automático falle y que además de eso se produzcan problemas para activar el modo manual.</p> <p>4. Fluctuaciones en la alimentación ocasionando subtensiones o sobretensiones que impiden la entrada del control.</p> <p>5. Que se presente bloqueo del modulo de transferencia automática en el momento que existe ausencia de tensión.</p>	<p>1. La falla en el vigilante de tensión, puede ocasionar que los motores fallen, involucrando además un problema de protecciones ocasionando la parada total del bombeo y por tanto vertimientos.</p> <p>2. La caída de los espigos de control de las válvulas de control puede ocasionar la perdida de flujo a la entrada de las cámaras donde están las bombas, ocasionando el represamiento y por tanto el vertimiento en los manholes adyacentes.</p> <p>3. El incremento parcial o total de una señal de control puede ocasionar la parada total de las estación de bombeo ocasionando el vertimiento de las mismas en los manholes más cercanos.</p> <p>4. Las protecciones de los equipos ocasionan la salida temporal de la estación de bombeo.</p> <p>5. Provoca la ausencia de energía ocasionado parada total de la estación y por tanto el vertimiento de las mismas.</p>

FALLO FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA
<p>2. Bombear un flujo inferior de 1700 l/seg con una cabeza de 20 mts.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Atascamiento en el impulsor de la bomba de 600 Lts/seg.</li> <li>2. Fractura en el tornillo de ajuste del impulsor de la bomba de 600 lts/seg</li> <li>3. Rotura del impulsor de la bomba</li> <li>4. Motor quemado de cada de las bombas</li> <li>5. Falla del sello mecánico lado agua de la bomba</li> <li>6. Falla el sello mecánico lado cámara de aceite</li> <li>7. Falla en los rodamientos del conjunto motor-bomba de la bomba.</li> <li>8. Fractura del eje de la bomba de 600 Lts/seg.</li> <li>9. Falla en el chavetero de la bomba de 600 Lts/seg.</li> <li>10. Fractura en los pernos que anclan el soporte donde se aloja la bomba sumergible.</li> <li>11. Fractura en la voluta de la bomba.</li> <li>12. Taponamiento en el circuito de refrigeración del equipo de bombeo.</li> <li>13. Humedad en la bornera de conexión de los cables de fuerza del motor.</li> <li>14. Problemas en las bobinas o en los contactos móviles y fijos de los contactores del cuadro de control o un cable mal fijado.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Parada total del equipo ocasionando vertimientos por la falta de evacuación del flujo de entrada.</li> <li>2. Parada parcial del bombeo hasta que se extraiga el equipo para sustituir el tornillo.</li> <li>3. Parada total del equipo ocasionando vertimientos de las aguas residuales.</li> <li>4. Parada total del bombeo hasta que se repare.</li> <li>5. Parada parcial dado que existe un sensor de humedad, vertimientos hasta que se sustituya.</li> <li>6. Parada total del bombeo dado que toca extraer la unidad para sustituirlo ocasionando vertimiento.</li> <li>7. Parada total del bombeo para efectuar sustitución de los mismos ocasionando vertimiento.</li> <li>8. Parada total para fabricación de eje, por tanto vertimiento en manholes adyacentes.</li> <li>9. Parada total del equipo hasta que se efectúe reparación del mismo.</li> <li>10. Parada total en el bombeo, es necesario verificar los niveles de vibración para evitar una falla de esta magnitud dado que para este caso se debe limitar el acceso de agua a los tanques.</li> <li>11. Parada total en el bombeo para efectuar la reparación o sustitución de la misma.</li> <li>12. Parada parcial para hacer extracción del equipo y limpieza del circuito de refrigeración.</li> <li>13. Parada total para verificar estanqueidad en la cámara de conexiones del motor.</li> <li>14. Parada parcial del bombeo hasta que se ejecute la revisión en el cuadro de control.</li> </ol>
<p>3. Bombeo con equipos operando a condiciones anormales.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Desgaste en los impulsores de la bomba.</li> <li>2. Deterioro en los anillos de desgaste del equipo.</li> <li>3. Fuga o una obstrucción en la línea de impulsión.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se presenta reducción en el flujo esperado y en la presión; ocasionado problemas en el tratamiento al final en la tubería del emisario.</li> <li>2. Parada parcial programada dado que la eficiencia del equipo se reduce bastante ocasionando además problemas de vibración.</li> <li>3. Parada total del bombeo hasta que se realice la reparación de la misma.</li> </ol>
<p>4. Problemas de estanqueidad en los tanques de almacenamiento.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Fisuras en los tanques de almacenamiento.</li> <li>2. Obstrucción en la entrada se presente rebose por la línea de emergencia.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Daño ambiental irreparable por la infiltración de aguas negras al acuífero.</li> <li>2. Daño ambiental por el vertimiento de aguas residuales a la Bahía de Santa Marta.</li> </ol>

### 5.3.3 ANALISIS DE RIESGO

PLANTA: Estación de bombeo de aguas residuales- EBAR NORTE.												
SISTEMA : Pretratamiento y disposición final de aguas residuales												
CALCULO DE FACTORES												
FALLAS OCULTAS			SEGURIDAD FISICA	MEDIO AMBIENTE	IMAGEN CORPORATIVA	COSTOS DE REPARACION			EFECTOS EN LOS CLIENTES			
Kfo=0.1			Ksf=0.1	Kma=0.4	Kic=0.1	Kor=0.1			Koc=0.2			
CALCULO DE RIESGO												
# F	#FF	#MF	MODO DE FALLA	O	FO	SF	MA	IC	OR	OC	S	R=OXs
1	1	1	Motores dañados de todas las unidades	1	1	3	4	4	3	4	3.5	3.5
1	1	2	Caída de los espigos de las compuertas	1	2	3	4	4	2	4	3.5	3.5
1	1	3	Daños en el funcionamiento del Plc.	1	3	2	4	3	2	4	3.4	3.4
1	1	4	Fluctuaciones en el nivel de tensión.	2	2	2	4	3	1	4	3.2	6.4
1	1	5	Bloqueo en la transferencia automática	1	4	2	4	3	3	4	3.6	3.6
1	2	1	Atascamiento en el impulsor de una bomba	3	4	2	4	4	3	4	3.7	11.1
1	2	2	Fractura en el tornillo de ajuste del impulsor	4	4	2	4	4	3	4	3.7	14.8
1	2	3	Rotura del impulsor de una bomba	2	4	2	4	4	3	4	3.7	7.4
1	2	4	Motor quemado de una unidad de bombeo	4	4	2	4	4	3	4	3.7	14.8
1	2	5	Fallas en el sello lado agua de una bomba	3	3	2	4	4	2	4	3.5	10.5
1	2	6	Fallas en el sello lado aceite de una bomba	3	3	2	4	4	2	4	3.5	10.5
1	2	7	Fallas en los rodamientos del conjunto motor-bomba	3	3	2	4	4	2	4	3.5	10.5
1	2	8	Fractura del eje de una bomba	1	2	2	4	4	3	4	3.5	3.5
1	2	9	Fallas en el chavetero de una bomba	1	2	2	3	3	1	3	2.6	2.6
1	2	10	Fallas en los pernos que anclan el soporte de una bomba sumergible	2	2	2	4	4	3	4	3.5	7
1	2	11	Fractura en la voluta de una bomba	1	2	2	4	4	3	4	3.5	3.5
1	2	12	Circuito de refrigeración de una bomba obstruido	1	2	2	3	3	1	3	2.6	2.6
1	2	13	Humedad en la bornera de conexión	2	2	2	4	4	2	3	3.2	6.4
1	2	14	Problemas en los contactores o cables sueltos del tablero de control	3	1	3	3	3	2	3	2.7	8.1
1	3	1	Desgaste en los impulsores	1	2	2	3	3	2	3	2.7	2.7
1	3	2	Deterioro en los anillos de desgaste	1	2	2	3	3	2	3	2.7	2.7
1	3	3	Fuga u obstrucción en la línea de impulsión	1	1	3	4	4	3	4	3.5	3.5
1	4	1	Fisuras en los tanques de almacenamiento	1	2	2	4	4	2	4	3.4	3.4
1	4	2	Obstrucción en las rejillas de entrada	1	1	3	4	4	1	4	3.3	3.3



### 5.3.4 SELECCIÓN DE TAREAS

<b>PLANTA:</b> Estación de bombeo de aguas residuales- EBAR NORTE.									
<b>SISTEMA :</b> Pretratamiento y disposición final de aguas residuales									
#F	#FF	#MF	C	Pv	Pd	D	TAREAS PROPUESTAS	F inicial	Ejecutor
1	1	1		x			Verificación de funcionamiento y respuesta de protecciones	mensual	Mantenimiento
1	1	2		x			Inspección al momento de operar la válvula	Permanente	Operaciones
1	1	3		x			Verificación del funcionamiento del Plc	mensual	Mantenimiento
1	1	4		x			Inspección al equipo identificador de fases	permanente	Operaciones
1	1	5		x			Inspección y verificación de operación del equipo	mensual	Mantenimiento
1	2	1		x			Limpieza de rejillas para evitar paso de sólidos	Diario	Operaciones
1	2	2			x		Instalación de equipo de vibraciones para monitoreo de condiciones	Permanente	Operaciones
1	2	3	x				Estar a espera de la ocurrencia de la falla		Operaciones
1	2	4			x		Efectuar monitoreo de condiciones e inspección de protecciones	mensual	Mantenimiento
1	2	5			X		Efectuar monitoreo con equipos sensores de humedad	Permanente	Operaciones
1	2	6			x		Efectuar monitoreo con equipos sensores de humedad	Permanente	Operaciones
1	2	7			x		Efectuar monitoreo con sondas PT-100 para medir temperatura de rodamientos	Permanente	Operaciones
1	2	8	x				Esperar a que ocurra la falla		Operaciones
1	2	10			x		Instalación de equipo de vibraciones para monitoreo de condiciones	Permanente	Mantenimiento
1	2	11	x				Esperar a que ocurra la falla		Operaciones
1	2	13			x		Efectuar monitoreo con equipos sensores de humedad	Permanente	Operaciones
1	2	14		X			Limpieza y lubricación de contactos, ajustes de cables de fuerza y control	Mensual	Mantenimiento
1	3	3	x				Esperar la ocurrencia de la falla		
1	4	1		x			Verificación de estado del tanque	Diario	Operaciones
1	4	2		x			Limpieza de rejillas de entrada para evitar obstrucción	Diario	Operaciones

**TABLA 13. ANALISIS FMECA Y COMPARACION ENTRE TAREAS PREVIAS Y ACTUALES**

<b>FALLO FUNCIONAL</b>	<b>COMPONENTE Y MODO DE FALLA</b>	<b>CAUSA DE LA FALLA</b>	<b>TAREA RCM</b>	<b>FRECUENCIA</b>	<b>TAREA ACTUAL</b>	<b>FRECUENCIA</b>
1. PARADA GENERAL DE LA ESTACION	1. TANQUE DE BOMBEO 1.1 COMPUERTA DE ACCESO A TANQUE	CORROSION EN EL TORNILLO DE FIJACION	RUTINA DE INSPECCION	SEMESTRAL	FUNCIONAMIENTO HASTA QUE FALLE	
		DEFLEXION EN EL EJE DE LA COMPUERTA	RUTINA DE INSPECCION	SEMESTRAL	FUNCIONAMIENTO HASTA QUE FALLE	
	2. PLC	1. DAÑOS EN LA FUENTE	RUTINA DE INSPECCION	SEMESTRAL	NINGUNA	
		2. DISPARO POR SOBREVOLTAJE O SUBVOLTAJE	RUTINA DE INSPECCION	BIMENSUAL	NINGUNA	
	3. TRANSFERENCIA AUTOMATICA	1. MOTOR DE ACCIONAMIENTO PEGADO	RUTINA DE INSPECCION	ANUAL	NINGUNA	
		2. PIN DE ACCIONAMIENTO MANUAL SUELTO	RUTINA DE INSPECCION	DIARIA	NINGUNA	
2. BOMBEAR A UN Q<1700 l/s	1.IMPULSOR					
	1.1 ATASCAMIENTO	1. ADMISIÓN DE SOLIDOS DE TAMAÑO SUPERIR	PDF, COLOCAR ACCIONAMIENTO TEMPORIZADOR A REJILLAS			
			LIMPIEZA E INSPECCIÓN PERMANENTE	CADA 4 HORAS	LIMPIEZA DE REJILLAS	CADA 8 HORAS
	1.2 FRACTURA	ADMISIÓN DE SOLIDOS, AUMENTO DE FISURA EN EL CHAVETERO, DESBALANCEO, VIBRACIÓN	INSPECCIÓN. PDF, MONITOREO DE VIBRACIONNES	BIMENSUAL	INSPECCIÓN	SEMESTRAL
	1.3 DESGASTE	INTRUSION DE ARENA	INSPECCION. PDF, CONSTRUIR DESARENADORES	BIMENSUAL	INSPECCIÓN	SEMESTRAL
	1.4 TORNILLO DE AJUSTE	INTRUSION DE PARTICULAS Y ARENA, AJUSTE INADECUADO, FALTA DE TRABA ROSCA, ANILLOS DE DESGASTE DETERIORADOS, VIBRACION	INSPECCIÓN. PDF, MONITOREO DE VIBRACIONES	BIMENSUAL	INSPECCIÓN	TRIMESTRAL
	2. MOTOR					
	2.1 FALLA EN EL AISLAMIENTO	HUMEDAD POR FILTRACIÓN, EXCESO DE CARGA	MONITOREO POR CONDICION	MENSUAL	MONITOREO POR CONDICION	BIMENSUAL
	2.2 FALLA EN SENSORES Y PROTECCIONES	DETERIORO DE SELLO MECANICO, HUMEDAD EN ACEITE	INPECCION DE SELLOS DE HUMEDAD	MONITOREO EN LINEA POR LOS COSTOS DE LA REPARACIÓN	MONITOREO POR CONDICION	BIMENSUAL

FALLO FUNCIONAL	COMPONENTE Y MODO DE FALLA	CAUSA DE LA FALLA	TAREA RCM	FRECUENCIA	TAREA ACTUAL	FRECUENCIA
	3 SELLOS MECANICOS					
	3.1 FRACTURA DE LAS CARAS DEL SELLO MECANICO	PRESENCIA DE ARENA EN LA VOLUTA	INSPECCION, PDF: CONSTRUCCION DE DESARENADOR	BIMENSUAL	INSPECCIÓN	BIMENSUAL
		CONTAMINACIÓN DEL ACEITE	INSPECCIÓN	BIMENSUAL	INSPECCIÓN	BIMENSUAL
		DESBALANCEO DEL IMPULSOR	MONITOREO DE VIBRACIONES	SEMESTRAL	NINGUNA	NINGUNA
		ALOJAMIENTO DE PARTICULAS EN LAS CARAS DEL SELLO	INSPECCIÓN ALA VOLUTA Y A LAS CARAS DEL SELLO	BIMENSUAL	NINGUNA	NINGUNA
	4. EJE DE LA BOMBA					
	4.1 FATIGA DEL EJE	CONTAMINACIÓN DEL LUBRICANTE POR ARENA	INSPECCION DEL LUBRICANTE	SEMESTRAL	NINGUNA	NINGUNA
	4.2 DESBALANCEO	DESPLAZAMIENTO EN EL PUNTO DE OPERACIÓN	DISEÑO OPTIMO DE LA OPERACION DE BOMBEO		NINGUNA	NINGUNA
		EXCESO DE ARENA ,VIBRACIÓN	INSPECCION , CONTRUCCION DEL DESARENADOR	BIMENSUAL	INSPECCIÓN	SEMESTRAL
	5. RODAMIENTOS					
	5.1 FALLOS	FALTA DE LUBRICANTE	INSPECCIÓN Y SUSTITUCIÓN	SEMESTRAL	NINGUNA	NINGUNA
		CONTAMINACION DEL LUBRICANTE	INSPECCIÓN Y SUSTITUCIÓN	SEMESTRAL	NINGUNA	NINGUNA
	6. VOLUTA DE LA BOMBA					
	6.1 REDUCCIÓN DEL FLUJO	RECIRCULACIÓN INTERNA	INSPECCIÓN	BIMENSUAL	NINGUNA	NINGUNA
	7. TAPA BORNERA DE CONECCIÓN					
	7.1 HUMEDAD EN LA TAPA Y DISPARO DE LAS PROTECCIONES DE FUERZA	COLOCACION INCORRECTA DEL ORING	INSPECCIÓN	BIMENSUAL	F.H.F	
		AJUSTE INADECUADO DE TORNILLERIA	INSPECCIÓN	BIMENSUAL	F.H.F	
		DESGASTE DE SELLOS	INSPECCIÓN	BIMENSUAL	F.H.F	
	8. CIRCUITO DE REFRIGERACIÓN					
	8.1 TAPONAMIENTO DEL CIRCUITO	INTRUSION DE PARTICULAS	INSPECCIÓN Y SONDEO CON MANGUERA A PRESIÓN	SEMESTRAL	F.H.F	F.H.F
	9. CIRCUITO DE CONTROL					
		FALLAS EN LAS BOBINAS	TERMOGRAFIA	ANUAL	NINGUNA	NINGUNA
	9.1 RETARDO EN LA SEÑAL DE RESPUESTA	ALTA TEMPERATURA EN LOS CONTACTORES	INSPECCIÓN CON PISTOLA DE TEMPERATURA Y AJUSTES DE CONTACTORES	MENSUAL	LIMPIEZA Y AJUSTE	TRIMESTRAL

**TABLA 14. ANALISIS DE LAS TAREAS DESARROLLADAS ACTUALMENTE SEGÚN PLAN DE MANTENIMIENTO ANUAL POR CADA BOMBA**

<b>TIPO DE ACTIVIDAD</b>	<b>TIPO DE MTTO</b>	<b>FRECUENCIA</b>	<b>HORAS-HOMBRE AÑO</b>
Pruebas de resistencia del aislamiento y de Carga	Preventivo	Bimensual	6
Ajuste de Contactos eléctricos, Limpieza y Lubricación de los mismos	Preventivo	Bimensual	12
Verificación de estado del tornillo del impulsor y ajuste del mismo	Preventivo	Trimestral	27
Verificación del lubricante en la cámara de aceite	Preventivo	Trimestral	27
Verificación de las señales de protección contra humedad en la cámara de aceite y en el motor, sobre temperatura	Preventivo	Bimensual	12
Servicios de termografía	Predictivo	Anual	8
<b>TOTAL POR BOMBA</b>			92
<b>TOTAL BOMBAS ESTACION</b>			460
<b>NOTA:</b> Los servicios de Termografía se asocian al valor de H-H (Es un servicio contratado)			

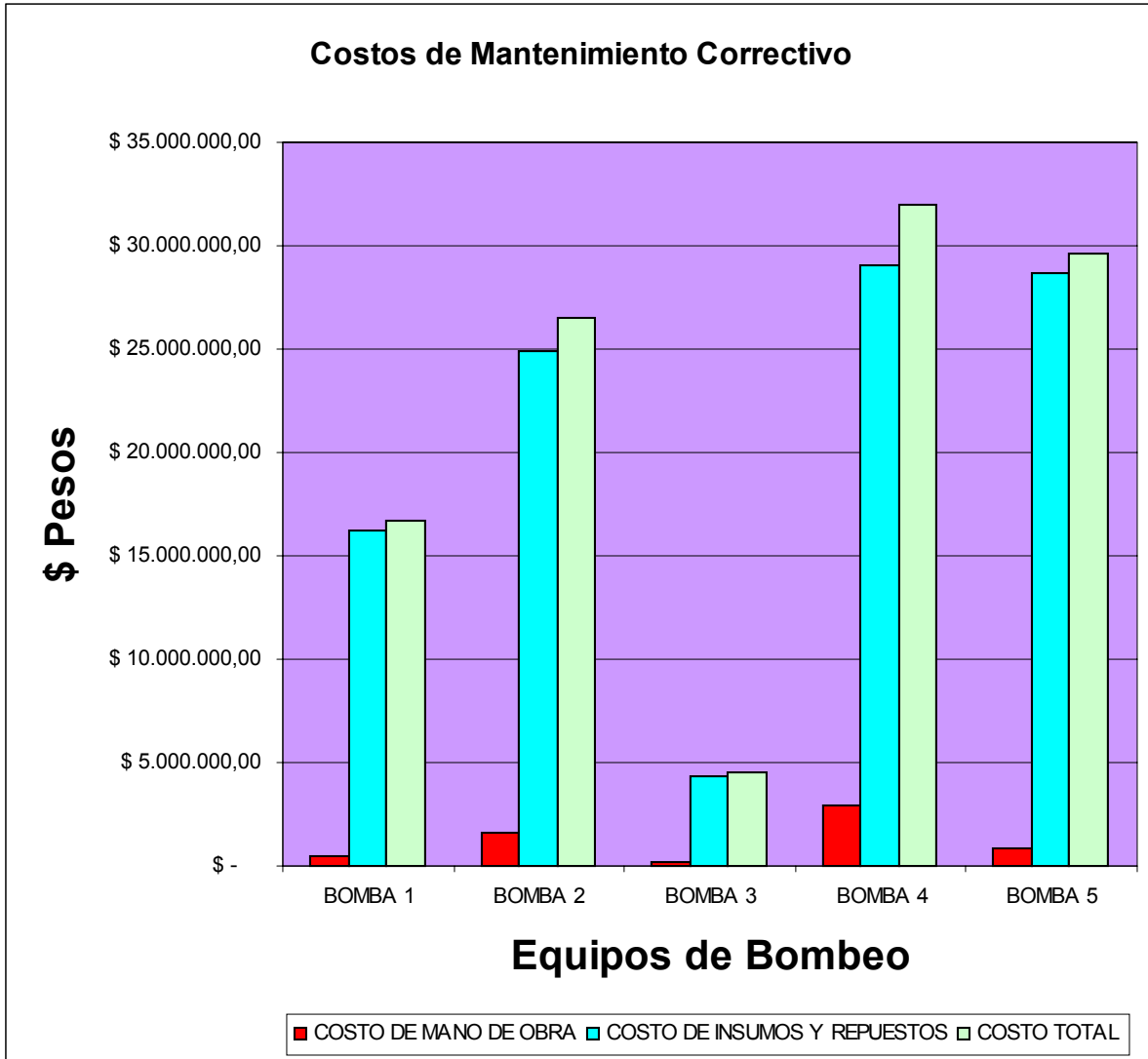
**TABLA 15. TAREAS DE RCM PROPUESTAS POR EL ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD**

<b>FRECUENCIA DIARIA</b>	<b>MTTO</b>	<b>RECURSO</b>	<b>H-H</b>	<b>H-H TOTAL</b>	<b>APLICA</b>
INSPECCIONAR PIN DE ACCIONAMIENTO MANUAL DE LA TRANFERENCIA AUTOMATICA	PREV	1	0,25	91,25	ESTACION
<b>FRECUENCIA MENSUAL</b>					
INSPECCIONAR CON PISTOLA LA TEMPERATURA DE CONTACTORES	PREV-PRED	2	1	24	ESTACION
MONITOREO POR CONDICION DE LOS AISLAMIENTOS DEL MOTOR	PREV	1	1	60	5 BOMBAS
<b>FRECUENCIA BIMENSUAL</b>					
INSPECCIONAR DESGASTE DE LOS SELLOS EN LA TAPA DE LA BORNERA	PREV	2	2	120	5 BOMBAS
INSPECCIONAR AJUSTE INADECUADO DE TORNILLOS DE LA TAPA DE LA BORNERA	PREV	2	1	60	5 BOMBAS
INSPECCIONAR COLOCACION DEL ORING DE LA TAPA	PREV	2	0,25	15	5 BOMBAS
INSPECCIONAR RECIRCULACION INTERNA EN LA VOLUTA	PREV	3	4	360	5 BOMBAS
MONITORIAR VIBRACION Y EXCESO DE ARENA EN LA VOLUTA	PREV	2	2	120	5 BOMBAS
INSPECCIONAR PARTICULAS EN LA CARA DEL SELLO	PREV	2	2	120	5 BOMBAS
INSPECCIONAR CONTAMINACION DE ACEITE	PREV	2	0,5	30	5 BOMBAS
MONITORIAR VIBRACIONES DEL IMPULSOR Y TORNILLO DE AJUSTE	PREV-PRED	2	3	180	5 BOMBAS
INSPECCIONAR DESGASTE EN EL IMPULSOR	PREV	2	0,5	30	5 BOMBAS
<b>FRECUENCIA SEMESTRAL</b>					
INSPECCIONAR CORROSION EN EL TORNILLO DE FIJACION DELA COMPUERTA DEL TANQUE	PREV	1	0,25	0,5	ESTACION
INSPECCIONAR DEFLEXION EN EL EJE DE LA COMPUERTA DEL TANQUE	PREV	1	0,25	0,5	ESTACION
INSPECCIONAR EL FUNCIONAMIENTO DEL P.L.C	PREV	1	2	4	ESTACION
INSPECCIONAR CONTAMINACION Y NIVEL DEL LUBRICANTE EN LA CAMARA DE ACEITE	PREV	3	2	60	5 BOMBAS
INSPECCIONAR CONTAMINACION Y NIVEL DEL LUBRICANTE EN LA CAMARA DE GRASA	PREV	3	2	60	5 BOMBAS
INSPECCION Y SONDEO DEL CIRCUITO DE REFRIGERACION	PREV	2	2	40	5 BOMBAS
<b>FRECUENCIA ANUAL</b>					
TERMOGRAFIA	PREV-PRED	1			ESTACION
INSPECCIONAR ACCIONAMIENTOS DE LA TRANFERENCIA AUTOMATICA	PREV	1	2	2	ESTACION
	HORAS HOMBRE AL AÑO			<b>1285</b>	
TAREAS COMPLEMENTARIAS					
<b>FRECUENCIA MONITOREO EN LINEA</b>					
VERIFICAR FUNCIONAMIENTO DE SENSORES Y PROTECCIONES					
<b>FRECUENCIA CADA 4 HORAS</b>					
INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DE REJILLAS	PREV-PRED				ESTACION
	PREV	1	0,5		ESTACION

## 5.4 ANALISIS DE COSTOS

TABLA 16. ANALISIS DE COSTOS DEL MANTENIMIENTO CORRECTIVO DURANTE LOS AÑOS 2002/2003 DE LOS EQUIPOS DE BOMBEO						
EQUIPO DE BOMBEO	RECURSOS	TIEMPO DE REPARACION	MANO DE OBRA	COSTO DE MANO DE OBRA	COSTO DE INSUMOS Y REPUESTOS	COSTO TOTAL
		HORAS	H-H GENERADAS	PESOS	PESOS	PESOS
BOMBA 1	3 Oficiales y 4 Ayudantes	172	616	\$ 428.040,00	\$ 16.241.521,00	\$ 16.669.561,00
BOMBA 2	7 Oficiales y 9 Ayudantes	256	880	\$ 1.648.272,00	\$ 24.889.367,00	\$ 26.537.639,00
BOMBA 3	3 Oficiales y 6 Ayudantes	24	72	\$ 142.680,00	\$ 4.357.000,00	\$ 4.499.680,00
BOMBA 4	1 Supervisor, 5 Oficiales y 8 Ayudantes	209	935	\$ 2.910.116	\$ 29.101.321,00	\$ 32.011.437,00
BOMBA 5	5 Oficiales y 10 Ayudantes	344	1232	\$ 895.800,00	\$ 28.704.487,00	\$ 29.600.287,00
<b>COSTO TOTAL</b>					<b>\$</b>	<b>109.318.604,00</b>

**Figura. 28 Costos de Mantenimiento Correctivo**



**TABLA 17. ANALISIS DE COSTOS POR OVERHAUL DURANTE LOS AÑOS  
2002/2003 EN LOS EQUIPOS DE BOMBEO**

EQUIPO DE BOMBEO	MANO DE OBRA	COSTO DE MANO DE OBRA	COSTO DE INSUMOS Y REPUESTOS	COSTO TOTAL
	H-H GENERADAS	PESOS	PESOS	PESOS
BOMBA 1	224	\$ 415.216,00	\$ 4.200.000,00	\$ 4.615.216,00
BOMBA 2	224	\$ 415.216,00	\$ 4.200.000,00	\$ 4.615.216,00
BOMBA 3	448	\$ 830.432,00	\$ 8.200.000,00	\$ 9.030.432,00
BOMBA 4	448	\$ 830.432,00	\$ 8.200.000,00	\$ 9.030.432,00
BOMBA 5	224	\$ 415.216,00	\$ 4.200.000,00	\$ 4.615.216,00
<b>COSTO TOTAL</b>				<b>\$ 31.906.512,00</b>

Las actividades de overhaul realizadas de las unidades de bombeo N° 1,2 5 son las siguientes



**TABLA 18. ANALISIS DE COSTOS DE LAS RUTINAS DE MANTENIMIENTO PREVENTIVAS ACTUALES DURANTE LOS AÑOS 2002/2003 POR CADA UNO DE LOS EQUIPOS DE BOMBEO**

TIPO DE ACTIVIDAD	RECURSOS	TIEMPO DE TRABAJO EN DOS AÑOS	MANO DE OBRA	COSTO DE MANO DE OBRA	COSTO DE INSUMOS Y REPUESTOS	COSTO TOTAL
		HORAS	H-H GENERADAS	PESOS	PESOS	PESOS
Limpieza y lubricacion de Contactos del tablero de control	1 Oficial y 1 Ayudante	24	48	\$ 107.496,00	\$ 240.000,00	\$ 347.496,00
Verificacion de Temperatura y ajuste de Cables de Fuerza y Control	1 Oficial y 1 Ayudante	24	48	\$ 107.496,00	\$ 80.000,00	\$ 187.496,00
Verificacion de Ajuste del Impulsor y Lmpieza de la Voluta	1 Oficial y 2 ayudantes	12	36	\$ 71.340	\$ 120.000,00	\$ 191.340,00
Verificacion del Lubricante de la camara de Aceite	1 Oficial y 2 ayudantes	8	24	\$ 47.560	\$ 80.000,00	\$ 127.560,00
Medidas de resistencia del aislamiento del motor electrico mas pruebas de carga	1 Oficial y 1 ayudante	12	24	\$ 53.748,00	\$ 60.000,00	\$ 113.748,00
Termografia( Contratada)	Equipo Contratado				\$ 1.100.000,00	\$ 1.100.000,00
Verificacion de estanqueidad tapa superior	1 Oficial y 2 ayudantes	18	54	\$ 107.010	\$ 320.000,00	\$ 427.010,00
Verificacion de las señales de Proteccion	1 Oficial y 1 ayudante	12	24	\$ 53.748,00	\$ 80.000,00	\$ 133.748,00
<b>COSTO TOTAL AÑO 2003 Y 2004</b>						<b>\$ 2.628.398,00</b>
<b>COSTO PROMEDIO AÑO</b>						<b>\$ 1.314.199,00</b>
<b>COSTO PROMEDIO AÑO 5 BOMBAS</b>						<b>\$ 6.570.995,00</b>

**TABLA 19. ANALISIS DE LOS COSTOS TOTALES POR MANTENIMIENTO DURANTE LOS AÑOS 2002/2003 EN LOS EQUIPOS DE BOMBEO**

<b>EQUIPO DE BOMBEO</b>	<b>COSTOS PREVENTIVO</b>	<b>COSTOS CORRECTIVO</b>	<b>COSTOS OVERHALL</b>	<b>COSTOS VERTIMIENTOS</b>	<b>COSTO TOTAL</b>
BOMBA 1	\$ 2.628.398,00	\$ 16.669.561,00	\$ 4.615.216,00		\$ 23.913.175,00
BOMBA 2	\$ 2.628.398,00	\$ 26.537.639,00	\$ 4.615.216,00		\$ 33.781.253,00
BOMBA 3	\$ 3.154.077,60	\$ 4.499.680,00	\$ 9.030.432,00		\$ 16.684.189,60
BOMBA 4	\$ 3.154.077,60	\$ 32.011.437,00	\$ 9.030.432,00		\$ 44.195.946,60
BOMBA 5	\$ 2.628.398,00	\$ 29.600.287,00	\$ 4.615.216,00		\$ 36.843.901,00
ESTACION				\$ 300.000.000	\$ 155.418.465,20
<b>COSTO TOTAL</b>					<b>\$ 455.418.465,20</b>

**NOTA: LOS VERTIMIENTOS ESTAN SANCIONADAS SEGÚN LA LEY 99/93 CON MULTAS DE HASTA UNA SUMA EQUIVALENTE A 300 SMMLV. SE DIVIDE EL HISTORICO DE 3 SANCIONES ENTRE CADA UNO DE LOS EQUIPOS**

<b>TABLA 20. ANALISIS DE LOS COSTOS TOTALES SEGÚN LAS ESTRATEGIAS PROPUESTAS</b>					
<b>TIPO DE COSTO</b>	<b>SITUACION ACTUAL</b>	<b>SITUACION CON RCM</b>	<b>EQUIPOS 600+300 (L/SEG)</b>	<b>EQUIPO REDUNDANTE DE 1500 L/S CON VFD</b>	<b>EQUIPO SUSTITUTO DE 1500 L/S + REDUNDANCIA DE 1500 L/S CON VFD</b>
COSTO INICIO INVERSION	\$ 1.402.500.000,00	\$ 1.402.500.000,00	\$ 1.756.200.000,00	\$ 1.936.500.000,00	\$ 2.470.500.000,00
COSTOS DE ENERGIA	\$ 346.843.090,00	\$ 312.158.781,00	\$ 280.942.902,90	\$ 350.293.447,38	\$ 275.542.560,00
COSTOS DE OPERACION	\$ 45.875.000,00	\$ 45.875.000,00	\$ 45.875.000,00	\$ 45.875.000,00	\$ 45.875.000,00
COSTO DE MANTENIMIENTO	\$ 77.709.232,60	\$ 33.112.000,00	\$ 36.423.200,00	\$ 39.734.400,00	\$ 10.000.000,00
COSTO POR VERTIMIENTOS	\$ 300.000.000,00				
<b>LCC (ACTUAL)</b>	<b>\$ 8.186.301.855,00</b>	<b>\$ 4.756.711.284,00</b>	<b>\$ 4.871.304.171,00</b>	<b>\$ 5.674.257.063,00</b>	<b>\$ 5.312.245.167,00</b>

<b>TABLA 21. COSTOS DE MTTO CORRECTIVO Y PREVENTIVO</b>		
<b>MANTENIMIENTO</b>	<b>COSTOS ACTUALES</b>	<b>COSTOS CON RCM</b>
CORRECTIVO	\$ 54.659.302	\$ 27.329.650
PREVENTIVO	\$ 4.920.975	\$ 9.305.515

**Figura. 29 Comparación Costos Actuales con Costos RCM**

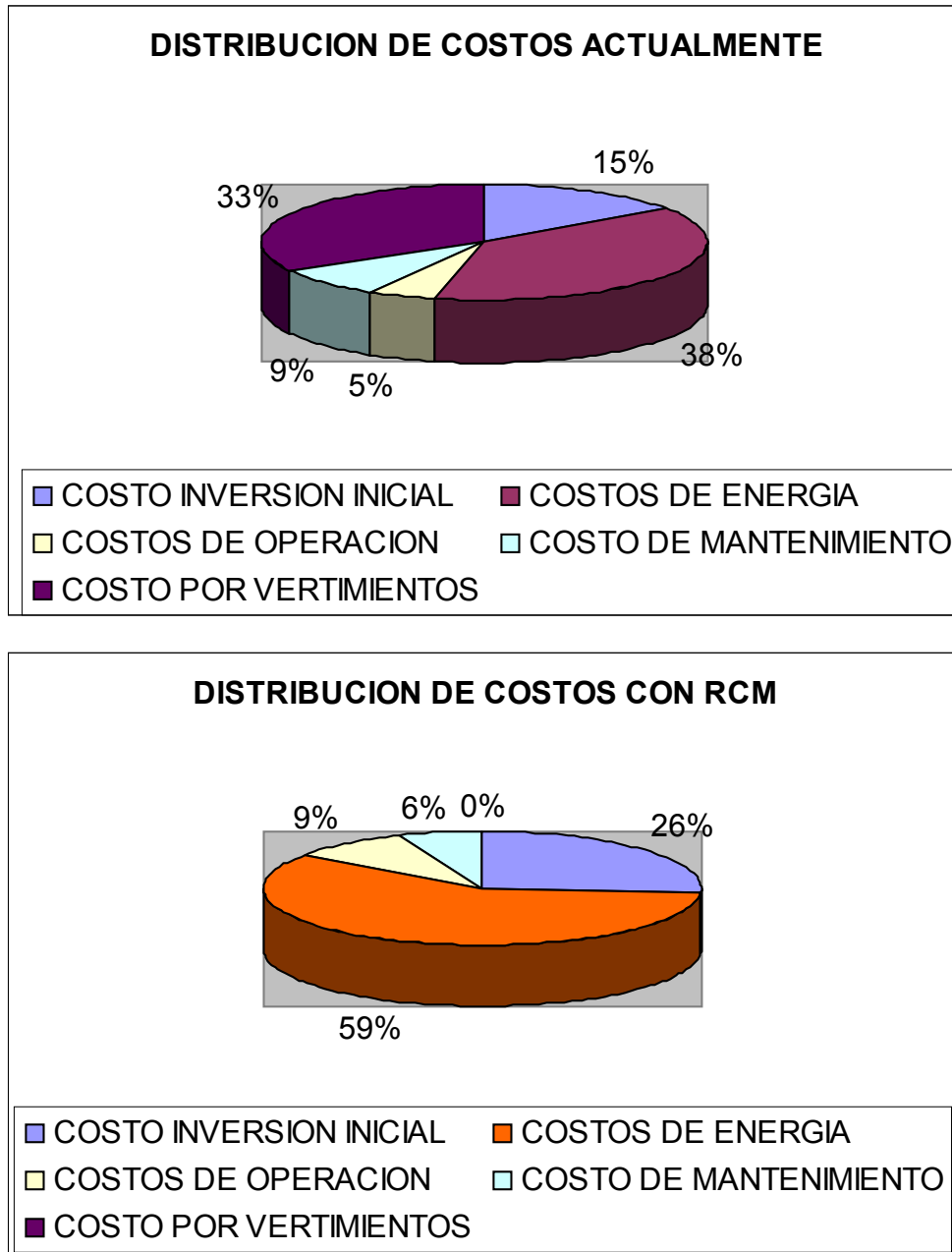
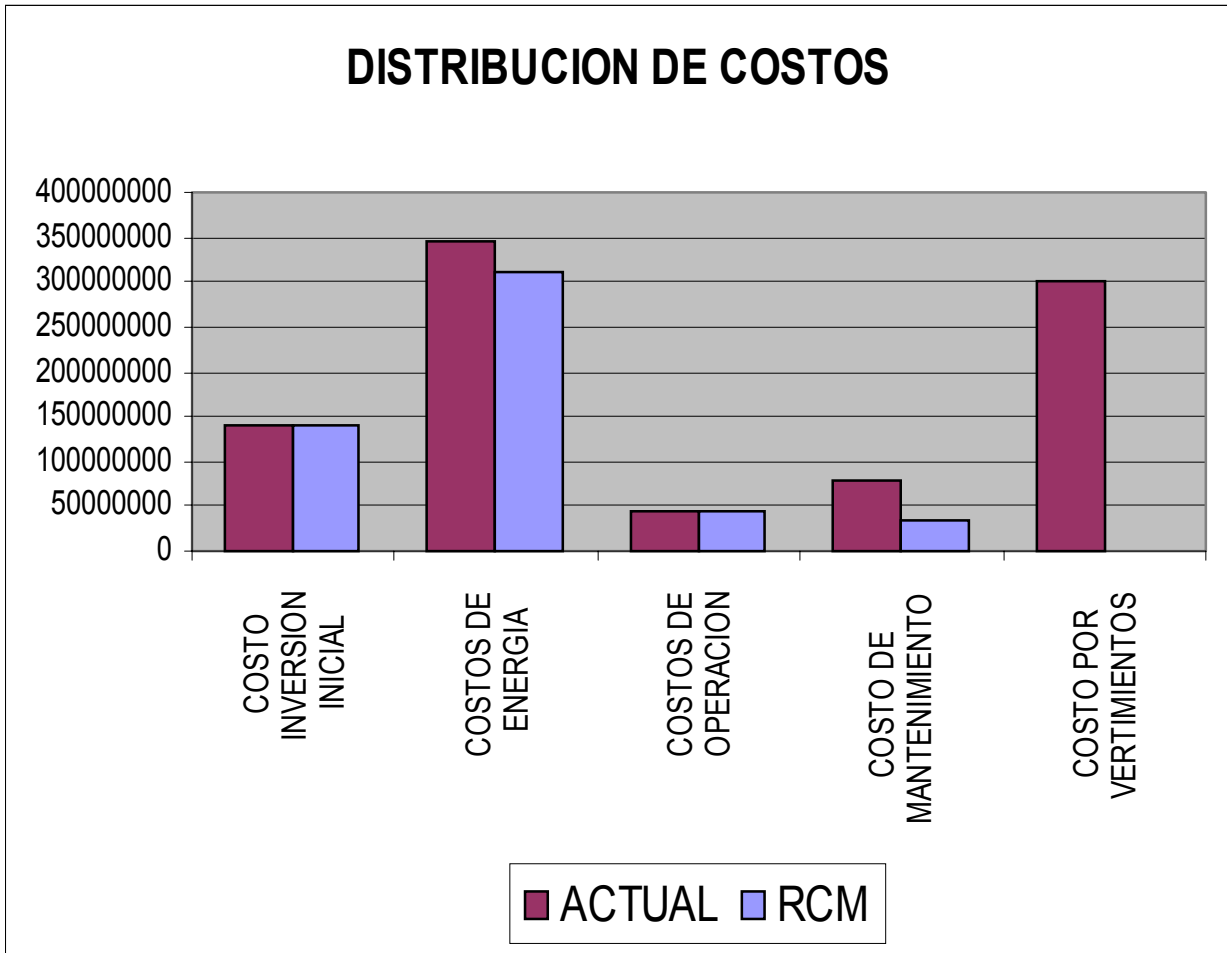


Figura. 30 Comparación Costos Actuales con Costos RCM en Barra



## 5.5 CAPACITACION DE PERSONAL

La capacitación del talento humano debe ir enfocada hacia la visión del mantenimiento centrado en confiabilidad, no solo en el enfoque técnico sino también hacer énfasis en que el mantenimiento ha de realizarse al sistema, estación de bombeo de aguas residuales, preservando su función, evacuar las aguas residuales y no enfocado a los equipos como tradicionalmente se venía haciendo.

Al hablar de talentos humanos, tanto podemos encontrarlos en el personal propio como en el contratado a terceros.

Al analizar el personal propio debemos partir de la estructura organizativa global con sus niveles metodologías de decisión establecidos.

Partiendo de esto y en función de las estrategias establecidas previamente, debemos definir la dotación y los perfiles requeridos para llevarlas adelante, así como las competencias y aptitudes necesarias para cada persona y puesto.

Luego debemos establecer procedimientos de selección de personal así como de capacitación continua que permitan que nuestro personal alcance las competencias y aptitudes requeridas en los perfiles de cargo establecidas, se recomienda para el control y seguimiento de esta etapa la utilización de la llamada **Matriz de Competencias**.

También muy importante en el desarrollo del personal es el crear sistemas de evaluación de desempeño, complementario con esto y con el plan de

capacitación, sistemas de motivación, reconocimiento y recompensa que estimulen el desarrollo personal , organizacional y premien los resultados.

Con respecto a los servicios de terceros debemos comenzar por especificar correctamente el servicio a contratar.

Luego establecer un sistema de calificación de proveedores, para una adecuada definición de a quiénes contratar.

Seguidamente debemos definir las formas de contratación: full service, por tarea o trabajo presupuestado, por administración a costo por unidad o costo por hora, lo que mejor se adecue a nuestra realidad.

Complementario con esto es necesario establecer los criterios de supervisión adecuados a la forma de contratación y tipo de trabajo que se debe efectuar, ambos en conjunto definen el cómo tercerizar.

El operador debe estar en capacidad de ajustar la operación a los requerimientos de cada momento.

Se le debe dotar con equipos de laboratorios que permitan determinar las características esenciales de operación, hacer los ajustes requeridos y controlar la calidad del efluente.

El programa de capacitación debe hacer énfasis en que el talento humano aprenda a:

- Conservar la planta perfectamente aseada y ordenada.

- Establecer un plan sistemático (tanto interior como exterior) para la ejecución de las operaciones cotidianas.
- Establecer un programa rutinario de inspección y lubricación.
- Llevar los datos y registros de cada pieza de equipo, enfatizando en lo relativo a incidentes poco usuales y condiciones operatorias deficientes. El mayor esfuerzo debe concentrarse en los registros de MTBF y MTTR.



## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Operacionalmente las bombas trabajan en serie y la confiabilidad de la estación debe ser del 98% comparado con un 36% de confiabilidad en treinta (30) días de operación.
- El tiempo medio entre fallas de las bombas de la estación no es ni el 20% del de una bomba típica.
- El tiempo medio para reparar las bombas de la estación, es inferior al de una bomba típica.
- Una bomba típica con una confiabilidad del 95% tiene una probabilidad de operar 122 días, en nuestro caso la bomba N° 5 operaría 44 días.
- Comparando la confiabilidad de los componentes de las bombas, de una bomba típica, se observa que después de sesenta (60) días de operación la probabilidad de fallar es mayor del 20%, lo que indica acciones de mantenimientos no mayores a ese tiempo. Excepto para el impulsor que puede ser de ciento ochenta (180) días.
- Para las cinco (5) bombas las fallas por componentes al año son de 43 fallas/año y son generados por el 35% de los modos de fallas que equivalen a 15 fallas al año.

- Las bombas tienen una tasa de falla creciente y está ubicada en la curva de la bañera en zona de desgaste.
- Las fallas al año no deben ser mayores de dos (2) para la estación de bombeo y nuestro estudio arrojó catorce (14) fallas.
- Para cinco (5) bombas el  $\lambda = 2,87$  fallas/año, lo que quiere decir, que existe la probabilidad que hayan entre dos (2) o tres (3) vertimientos en el año, por fallas de una o más bombas en un intervalo de tiempo de hora pico, que interrumpe la operación de la estación de bombeo.
- Para lograr una confiabilidad del 98% se debe contar con equipos de respaldo y operar el sistema con el menor número de bombas posibles para satisfacer la demanda.
- El no tener bombas de respaldo limita la confiabilidad del sistema.
- La configuración adoptada debe tener la misma altura dinámica para todas las bombas independiente de su caudal.
- El tipo de configuración actual reduce la confiabilidad del sistema por trabajar las bombas en serie, el punto de operación se desplaza del punto óptimo incurriendo en fallas del sistema.
- El fmeca debe realizarse para determinar causas de fallas, acciones y las frecuencias de mantenimiento.

- El sistema de bombeo debe operar lo más cerca posible del punto óptimo de operación.
- La capacidad de los tanques esta limitada para el crecimiento de la ciudad, por tanto no se permiten tiempos de retención y paradas programadas a horas pico.
- Muchas de las causas de fallas se deben al bajo desempeño del sistema de pretratamiento, en la actualidad no se cuenta con Desarenadores limitando la confiabilidad del sistema.
- Un análisis de confiabilidad permite distribuir los costos de mantenimiento y reducirlos al mismo tiempo que elimina el impacto ambiental causado por los vertimientos.
- Un programa de mantenimiento basado en RCM ayuda al personal a enfocar todos sus esfuerzos en preservar la función del sistema y no de un equipo.
- Toda acción de mantenimiento debe ser valorada en función de una relación costo vs beneficio.
- Como acciones preventivas a corto plazo se recomienda en primer lugar, estudiar el diseño y la instalación de variaciones de velocidad que trabajen con señales de control de nivel y de presión para buscar los ajustes necesarios en los ciclos de operación de cada una de las unidades de bombeo.

- Otra recomendación, pensando en el incremento de la confiabilidad es operar la estación con una sola unidad de bombeo cuyo ciclo de trabajo está demarcado dentro del desarrollo de su curva característica y utilizando una bomba de respaldo.

## BIBLIOGRAFIA

AVILA, Rubén. Fundamento de mantenimiento: Guías económicas técnicas y administrativas. México: Limusa, 1992.

DIAZ MATALOBOS, Ángel. Confiabilidad en mantenimiento: Caracas Venezuela: IESA ,1992.

KELLY, A y HARRIS, M .Gestión de Mantenimiento Industrial. Madrid España: Fundación repsom, 1998.

METCALF, Eddy. Ingeniería sanitaria redes de alcantarillado y bombeo de aguas residuales. 2 e. labor s a 1994.

MORA GUTIERREZ, Luis A. Gestión de mantenimiento en industrias usuarias o generadoras de tecnología avanzadas. España, 1999. Tesis doctoral. Universidad politécnica de valencia.

ROJAS Jaime. Introducción a la confiabilidad. Bogota Colombia: Universidad de los Andes, 1975.

ROMERO, Jairo. Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño. 2 E. Escuela Colombiana de Ingeniería 2002.

TORO Juan. CESPEDES Pedro. Metodología para medir confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad en mantenimiento .Medellín, 2001.Trabajo de grado (Ingeniero mecánico). Universidad EAFIT. Departamento de Ingeniería Mecánica.

<[http : // www. Mantenimiento mundial. Com / artículos ASP](http://www.Mantenimiento mundial. Com / artículos ASP) >

# ANEXO A

## CALCULO DE INDICADORES DE MANTENIMIENTO

### LISTADO HISTORICO DE FALLAS EBAR

<b>ESTACION NORTE</b>	<b>5 EQUIPOS</b>
<b>FECHA</b>	<b>FALLA BOMBA</b>
24/10/00	1
24/10/00	5
27/10/00	4
04/11/00	1
24/12/00	4
10/01/01	1
11/01/01	4
06/04/01	4
15/05/01	5
17/05/01	1
07/06/01	1
10/07/01	1
13/09/01	4
13/09/01	2
14/09/01	3
26/09/01	2
03/10/01	3
04/11/01	5
20/12/01	1
03/01/02	2
28/01/02	3
05/04/02	1
17/04/02	1
29/04/02	3
08/06/02	2
22/07/02	1
07/09/02	4
30/09/02	4
07/10/02	3
08/11/02	5
13/11/02	2

<b>ESTACION RODADERO</b>	<b>3 EQUIPOS</b>
<b>FECHA</b>	<b>FALLA BOMBA</b>
03/10/00	3
06/02/01	3
17/05/01	3
21/05/02	1
17/09/02	3
20/01/03	2
<b>TOTAL FALLAS</b>	<b>15</b>

<b>ESTACION BOSQUE</b>	<b>2 EQUIPOS</b>
<b>FECHA</b>	<b>FALLA BOMBA</b>
17/11/00	1
13/02/01	2
07/03/02	2
10/04/02	1
23/05/02	2
09/10/02	2
05/03/03	2
17/05/03	1
07/06/03	2
14/06/03	1
<b>TOTAL FALLAS</b>	<b>16</b>

<b>ESTACION MANZANARES</b>	<b>2 EQUIPOS</b>
<b>FECHA</b>	<b>FALLA BOMBA</b>
09/10/00	2
10/05/01	2
25/05/02	1
25/05/02	2
05/12/02	1
14/07/03	2
20/11/03	2
<b>TOTAL FALLAS</b>	<b>12</b>



<b>ESTACION CANTILLO</b>	<b>2 EQUIPOS</b>
<b>FECHA</b>	<b>FALLA BOMBA</b>
12/12/01	2
05/06/02	1
19/05/03	2
<b>TOTAL FALLAS</b>	<b>5</b>

<b>ESTACION LA CUEVA</b>	<b>2 EQUIPOS</b>
<b>FECHA</b>	<b>FALLA BOMBA</b>
04/01/02	2
15/03/02	1
24/01/03	2
04/01/03	2
07/01/03	1
28/07/01	2
24/07/03	2
<b>TOTAL FALLAS</b>	<b>12</b>

<b>ESTACION SAN PABLO</b>	<b>2 EQUIPOS</b>
<b>FECHA</b>	<b>FALLA BOMBA</b>
25/07/03	1
25/07/03	2
<b>TOTAL FALLAS</b>	<b>3</b>

# ANEXO B

## Weibull Database

**Weibull databases** require considerable use of engineering judgment for meaningful application of the facts stored in database format. **Do not apply the data blindly without understanding the specific situation, as this database is solely intended for educational purposes.**

Data, described in this database, are very general. The facts are broad as is usually found in engineering references. Typical values are given for a specific case which may not be applicable for each condition envisioned by the end user of the database as **exceptions always exist**. Therefore you are the sole responsible individual for use of this table-- Barringer & Associates, Inc. assumes no liability for your use/misuse of these tables in any manner either obvious or implied.

Item	Beta Values			Eta Values		
	(Weibull Shape Factor)			(Weibull Characteristic Life--hours)		
	Low	Typical	High	Low	Typical	High
<b>Components</b>				<b>My engineering judgment does not support the range of a few values shown in published databases</b>		
<a href="#">Ball bearing</a>	0.7	<b>1.3</b>	3.5	14,000	<b>40,000</b>	250,000
Roller bearings	0.7	<b>1.3</b>	3.5	9,000	<b>50,000</b>	125,000
Sleeve bearing	0.7	<b>1</b>	3	10,000	<b>50,000</b>	143,000
Belts, drive	0.5	<b>1.2</b>	2.8	9,000	<b>30,000</b>	91,000
Bellows, hydraulic	0.5	<b>1.3</b>	3	14,000	<b>50,000</b>	100,000
Bolts	0.5	<b>3</b>	10	125,000	<b>300,000</b>	100,000,000
Clutches, friction	0.5	<b>1.4</b>	3	67,000	<b>100,000</b>	500,000
Clutches, magnetic	0.8	<b>1</b>	1.6	100,000	<b>150,000</b>	333,000
Couplings	0.8	<b>2</b>	6	25,000	<b>75,000</b>	333,000
Couplings, gear	0.8	<b>2.5</b>	4	25,000	<b>75,000</b>	1,250,000
Cylinders, hydraulic	1	<b>2</b>	3.8	9,000,000	<b>900,000</b>	200,000,000
Diaphragm, metal	0.5	<b>3</b>	6	50,000	<b>65,000</b>	500,000
Diaphragm, rubber	0.5	<b>1.1</b>	1.4	50,000	<b>60,000</b>	300,000
Gaskets, hydraulics	0.5	<b>1.1</b>	1.4	700,000	<b>75,000</b>	3,300,000
Filter, oil	0.5	<b>1.1</b>	1.4	20,000	<b>25,000</b>	125,000
Gears	0.5	<b>2</b>	6	33,000	<b>75,000</b>	500,000
Impellers, pumps	0.5	<b>2.5</b>	6	125,000	<b>150,000</b>	1,400,000
Joints, mechanical	0.5	<b>1.2</b>	6	1,400,000	<b>150,000</b>	10,000,000

Knife edges, fulcrum	0.5	<b>1</b>	6	1,700,000	<b>2,000,000</b>	16,700,000
Liner, recip. comp. cyl.	0.5	<b>1.8</b>	3	20,000	<b>50,000</b>	300,000
Nuts	0.5	<b>1.1</b>	1.4	14,000	<b>50,000</b>	500,000
"O"-rings, elastomeric	0.5	<b>1.1</b>	1.4	5,000	<b>20,000</b>	33,000
Packings, recip. comp. rod	0.5	<b>1.1</b>	1.4	5,000	<b>20,000</b>	33,000
Pins	0.5	<b>1.4</b>	5	17,000	<b>50,000</b>	170,000
Pivots	0.5	<b>1.4</b>	5	300,000	<b>400,000</b>	1,400,000
Pistons, engines	0.5	<b>1.4</b>	3	20,000	<b>75,000</b>	170,000
Pumps, lubricators	0.5	<b>1.1</b>	1.4	13,000	<b>50,000</b>	125,000
Seals, mechanical	0.8	<b>1.4</b>	4	3,000	<b>25,000</b>	50,000
Shafts, cent. pumps	0.8	<b>1.2</b>	3	50,000	<b>50,000</b>	300,000
Springs	0.5	<b>1.1</b>	3	14,000	<b>25,000</b>	5,000,000
Vibration mounts	0.5	<b>1.1</b>	2.2	17,000	<b>50,000</b>	200,000
Wear rings, cent. pumps	0.5	<b>1.1</b>	4	10,000	<b>50,000</b>	90,000
Valves, recip comp.	0.5	<b>1.4</b>	4	3,000	<b>40,000</b>	80,000
<b>Machinery Equipment</b>						
Circuit breakers	0.5	<b>1.5</b>	3	67,000	<b>100,000</b>	1,400,000
Compressors, centrifugal	0.5	<b>1.9</b>	3	20,000	<b>60,000</b>	120,000
Compressor blades	0.5	<b>2.5</b>	3	400,000	<b>800,000</b>	1,500,000
Compressor vanes	0.5	<b>3</b>	4	500,000	<b>1,000,000</b>	2,000,000
Diaphragm couplings	0.5	<b>2</b>	4	125,000	<b>300,000</b>	600,000
Gas turb. comp. blades/vanes	1.2	<b>2.5</b>	6.6	10,000	<b>250,000</b>	300,000
Gas turb. blades/vanes	0.9	<b>1.6</b>	2.7	10,000	<b>125,000</b>	160,000
Motors, AC	0.5	<b>1.2</b>	3	1,000	<b>100,000</b>	200,000
Motors, DC	0.5	<b>1.2</b>	3	100	<b>50,000</b>	100,000
Pumps, centrifugal	0.5	<b>1.2</b>	3	1,000	<b>35,000</b>	125,000
Steam turbines	0.5	<b>1.7</b>	3	11,000	<b>65,000</b>	170,000
Steam turbine blades	0.5	<b>2.5</b>	3	400,000	<b>800,000</b>	1,500,000
Steam turbine vanes	0.5	<b>3</b>	3	500,000	<b>900,000</b>	1,800,000
Transformers	0.5	<b>1.1</b>	3	14,000	<b>200,000</b>	14,200,000
<b>Instrumentation</b>						
Controllers, pneumatic	0.5	<b>1.1</b>	2	1,000	<b>25,000</b>	1,000,000
Controllers, solid state	0.5	<b>0.7</b>	1.1	20,000	<b>100,000</b>	200,000
Control valves	0.5	<b>1</b>	2	14,000	<b>100,000</b>	333,000
Motorized valves	0.5	<b>1.1</b>	3	17,000	<b>25,000</b>	1,000,000
Solenoid valves	0.5	<b>1.1</b>	3	50,000	<b>75,000</b>	1,000,000
Transducers	0.5	<b>1</b>	3	11,000	<b>20,000</b>	90,000

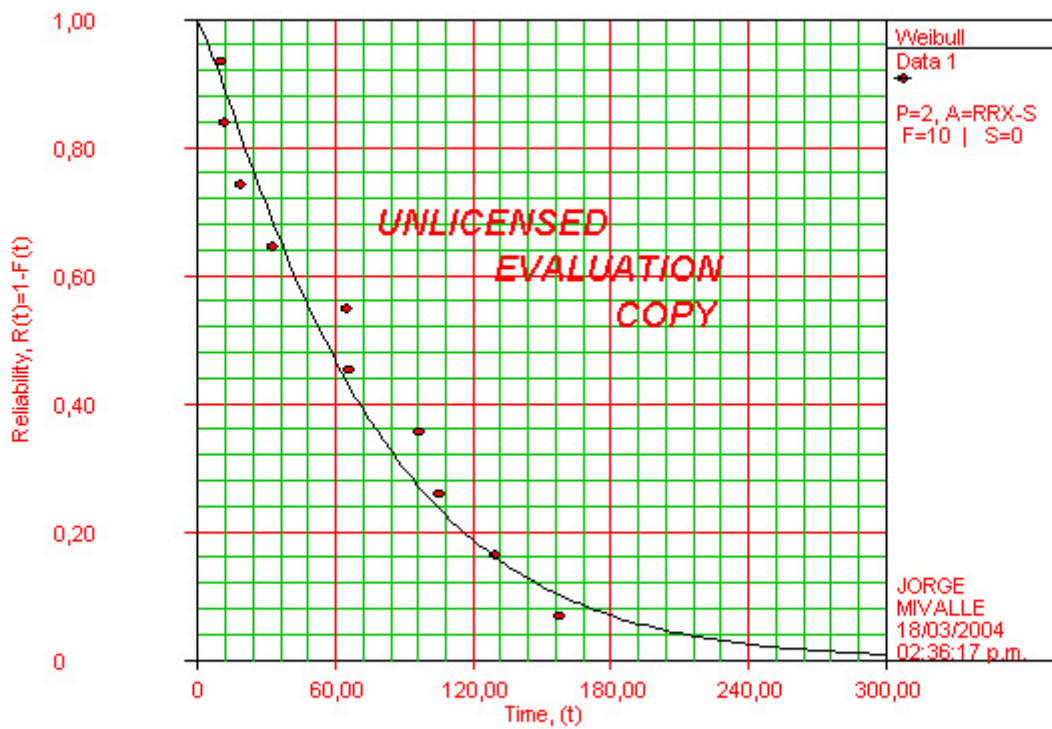
Transmitters	0.5	<b>1</b>	2	100,000	<b>150,000</b>	1,100,000
Temperature indicators	0.5	<b>1</b>	2	140,000	<b>150,000</b>	3,300,000
Pressure indicators	0.5	<b>1.2</b>	3	110,000	<b>125,000</b>	3,300,000
Flow instrumentation	0.5	<b>1</b>	3	100,000	<b>125,000</b>	10,000,000
Level instrumentation	0.5	<b>1</b>	3	14,000	<b>25,000</b>	500,000
Electro-mechanical parts	0.5	<b>1</b>	3	13,000	<b>25,000</b>	1,000,000
<b>Static Equipment</b>						
Boilers, condensers	0.5	<b>1.2</b>	3	11,000	<b>50,000</b>	3,300,000
Pressure vessels	0.5	<b>1.5</b>	6	1,250,000	<b>2,000,000</b>	33,000,000
Filters, strainers	0.5	<b>1</b>	3	5,000,000	<b>5,000,000</b>	200,000,000
Check valves	0.5	<b>1</b>	3	100,000	<b>100,000</b>	1,250,000
Relief valves	0.5	<b>1</b>	3	100,000	<b>100,000</b>	1,000,000
<b>Service Liquids</b>						
Coolants	0.5	<b>1.1</b>	2	11,000	<b>15,000</b>	33,000
Lubricants, screw compr.	0.5	<b>1.1</b>	3	11,000	<b>15,000</b>	40,000
Lube oils, mineral	0.5	<b>1.1</b>	3	3,000	<b>10,000</b>	25,000
Lube oils, synthetic	0.5	<b>1.1</b>	3	33,000	<b>50,000</b>	250,000
Greases	0.5	<b>1.1</b>	3	7,000	<b>10,000</b>	33,000

# ANEXO C

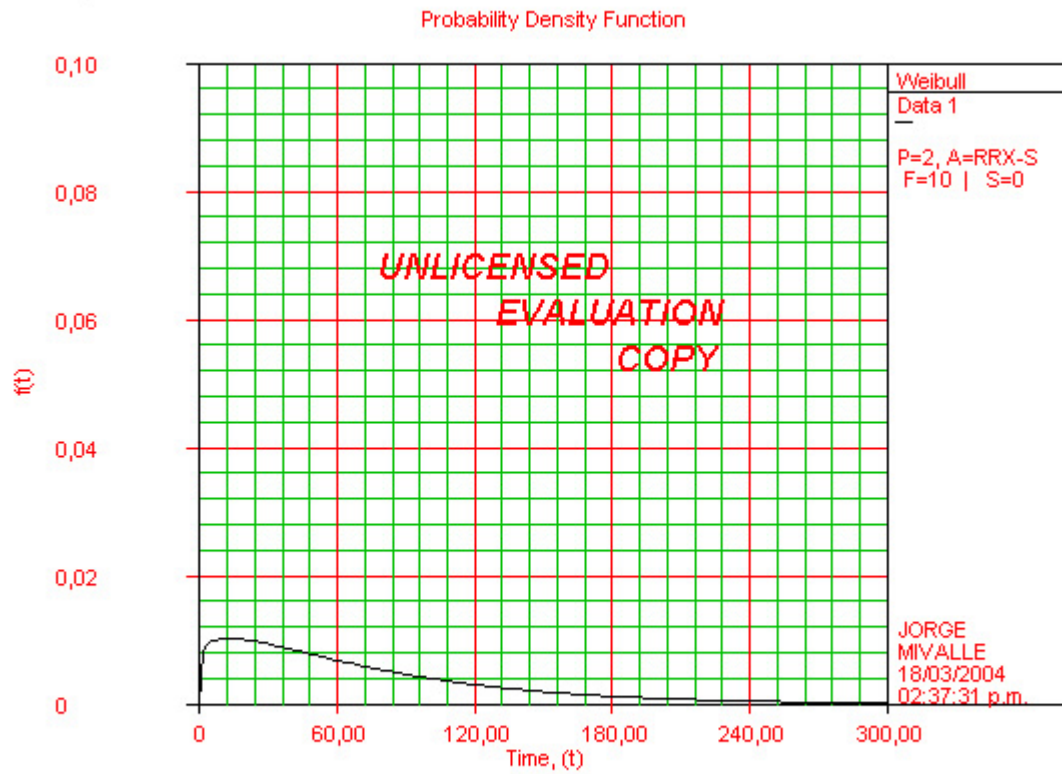
## RESULTADOS ARROJADOS POR EL SOFTWARE

Generated by: ReliaSoft's Weibull++ 5.0 - www.Weibull.com - 888-886-0410

Reliability vs Time Plot

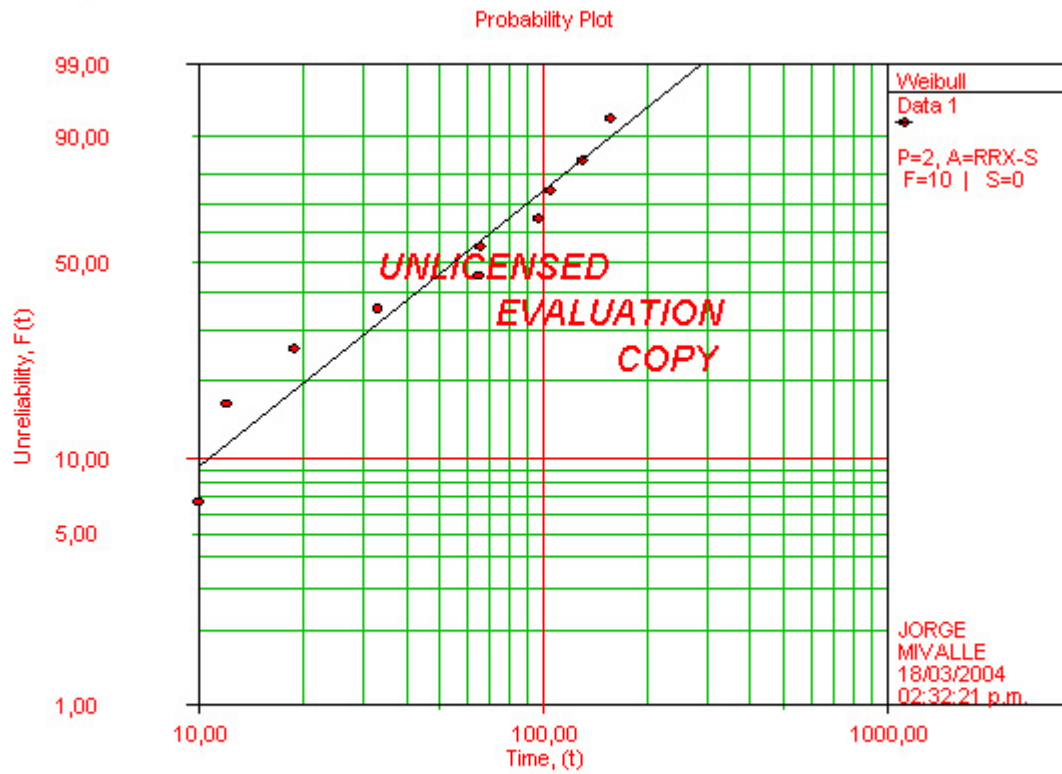


$\beta=1.14, \eta=76.21, \rho=0.97$

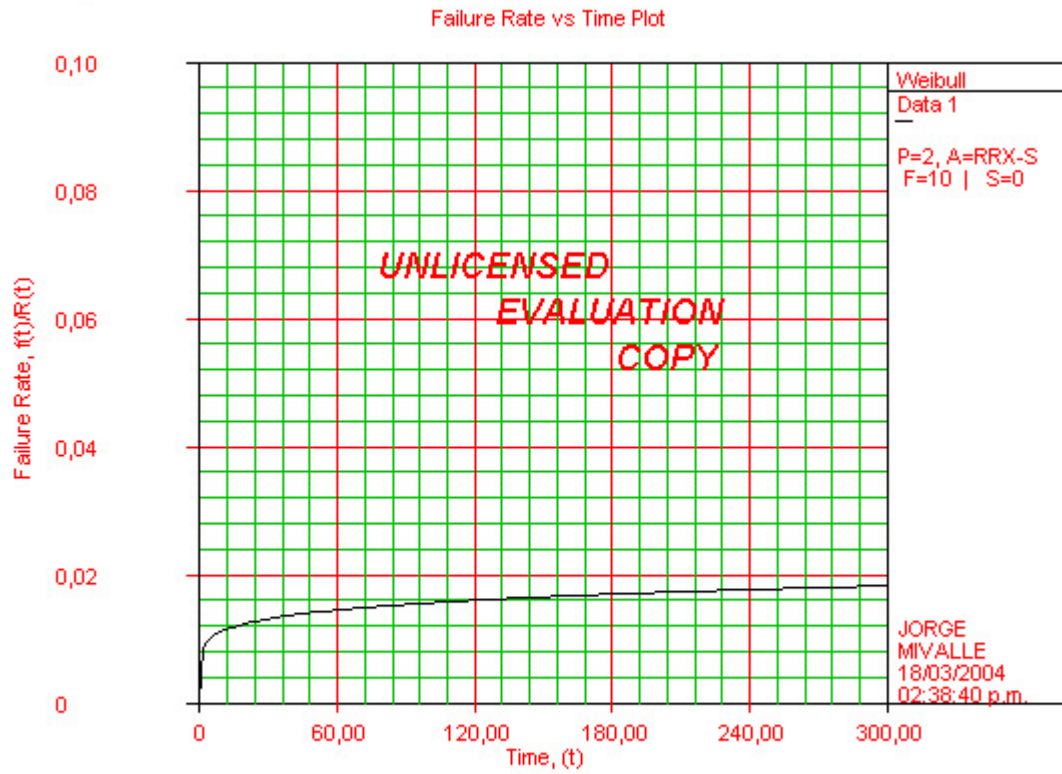


---

$\beta=1,14, \eta=76,21, \rho=0,97$

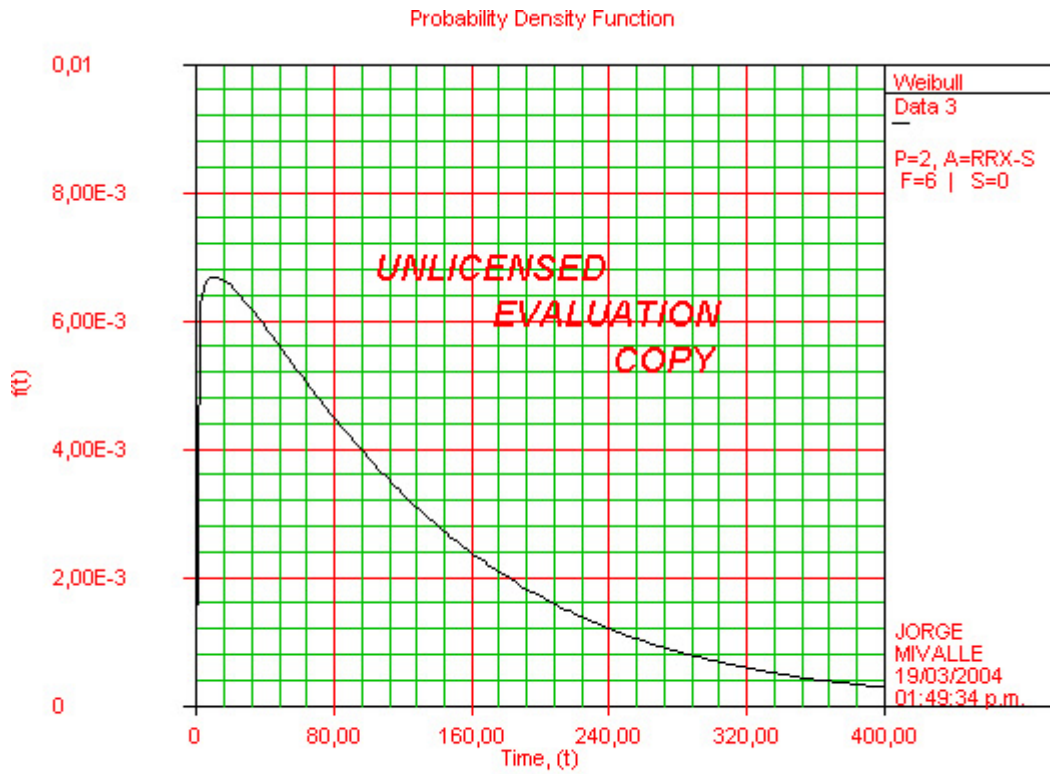


$\beta=1.14, \eta=76.21, \rho=0.97$

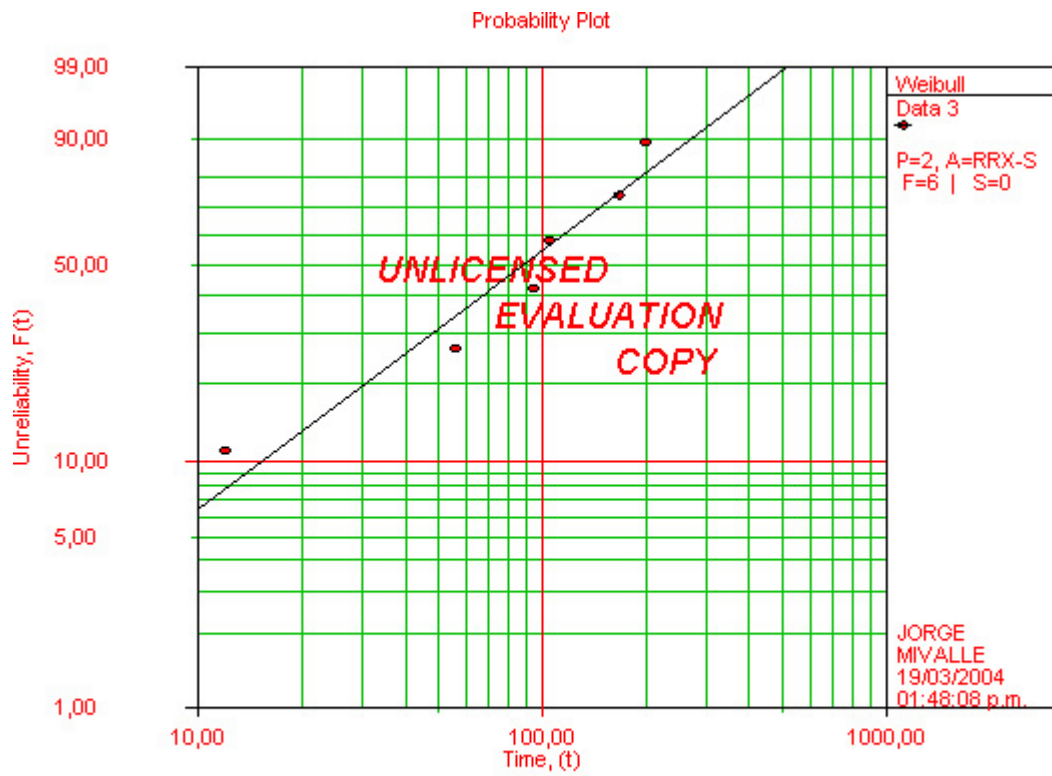


$\beta=1.14, \eta=76.21, \rho=0.97$



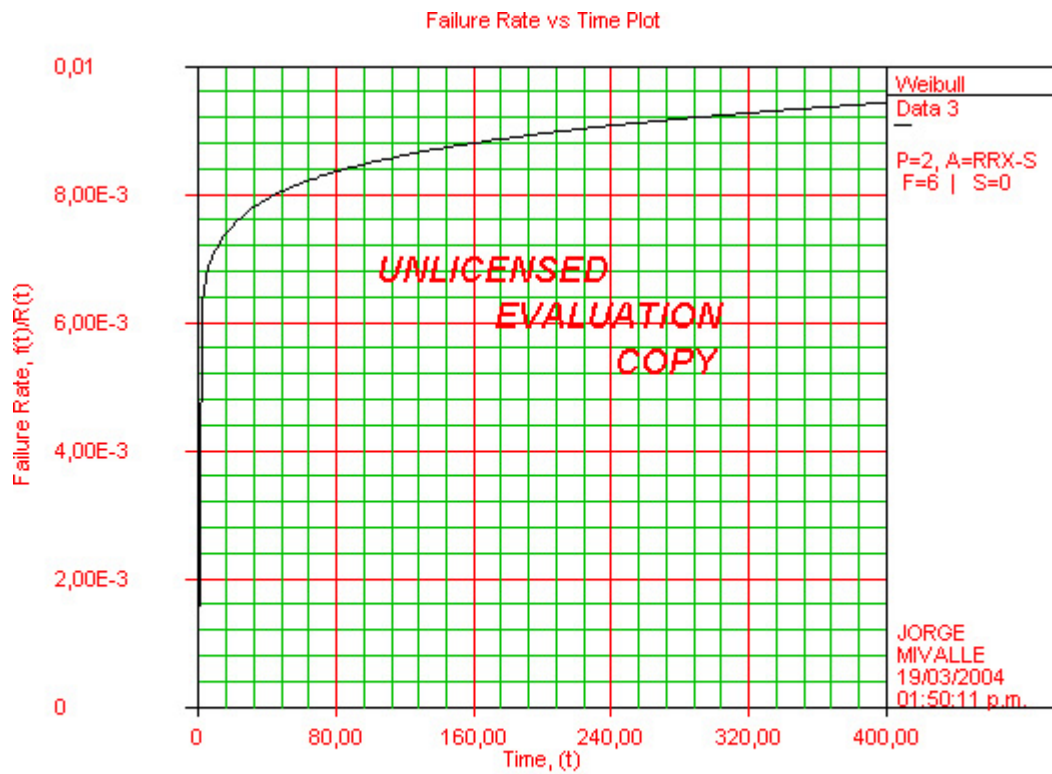


$\beta=1.08, \eta=124.53, \rho=0.97$

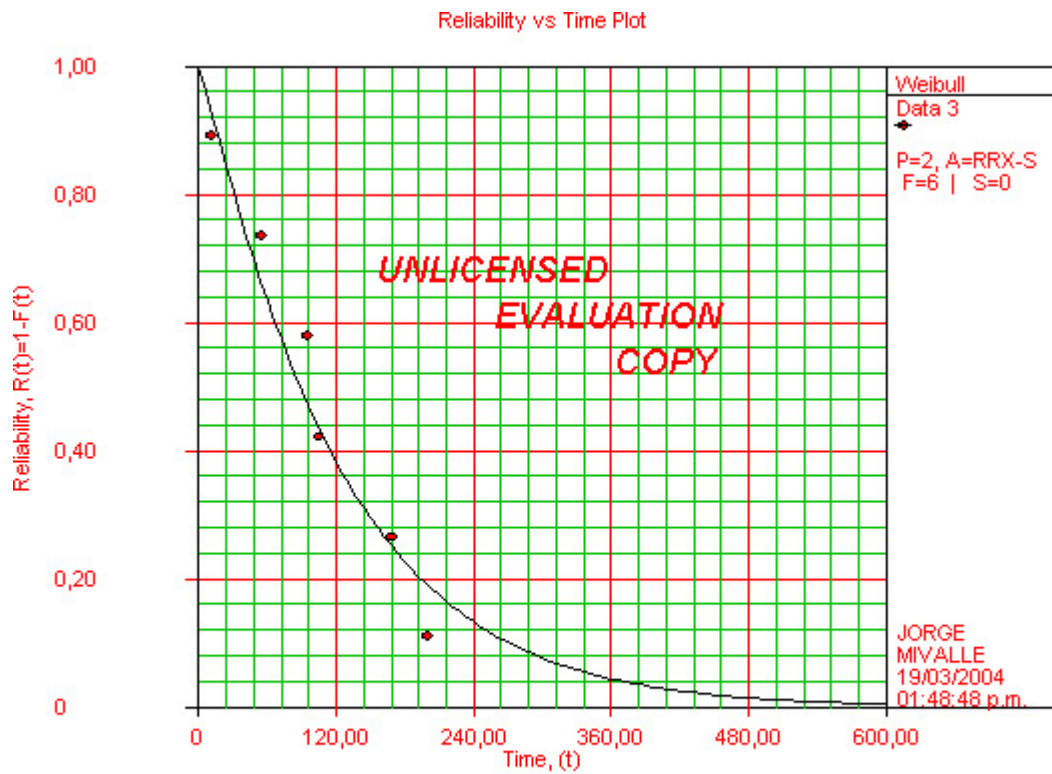


---

$\beta=1,08, \eta=124,53, \rho=0,97$



$\beta=1,08, \eta=124,53, \rho=0,97$



$\beta=1,08, \eta=124,53, \rho=0,97$