

**ANALISIS DE CONFIABILIDAD EN LOS EQUIPOS DE BOMBEO DE
AGUA CRUDA EN LA EMPRESA ACUACAR S.A.**

**Roberto Rafael Curiel Campillo
Gonzalo Alberto Padilla Cantillo**



**FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
CARTAGENA DE INDIAS
2010**

**ANALISIS DE CONFIABILIDAD EN LOS EQUIPOS DE BOMBEO DE
AGUA CRUDA EN LA EMPRESA ACUACAR S.A.**

Roberto Rafael Curiel Campillo

Gonzalo Alberto Padilla Cantillo

**Trabajo Final Integrador para optar el título de Especialista en
Gerencia de Mantenimiento**

Director Trabajo Final Integrador

MSc, ME Alfredo Miguel Abuchar Curi



**FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
CARTAGENA DE INDIAS**

2010

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Cartagena de Indias D. T. y C., 13 de Diciembre de 2010

Cartagena de Indias D. T. y C., 13 de Diciembre de 2010

Señores:

Comité Evaluador

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Universidad Tecnológica De Bolívar

Ciudad.

Apreciados señores:

Por medio de la presente nos permitimos someter para su estudio, consideración y aprobación el Trabajo Final Integrador titulado **“ANALISIS DE CONFIABILIDAD EN LOS EQUIPOS DE BOMBEO DE AGUA CRUDA EN LA EMPRESA ACUACAR S.A.”** realizada por los estudiantes **Roberto Rafael Curiel Campillo** y **Gonzalo Alberto Padilla Cantillo**, para optar al título de Especialistas en Gerencia de Mantenimiento.

Cordialmente,



Roberto Rafael Curiel Campillo



Gonzalo Alberto Padilla Cantillo

CESIÓN DE DERECHOS PATRIMONIALES

Cartagena de Indias D. T. y C., 13 de Diciembre de 2010

Yo, **Roberto Rafael Curiel Campillo**, manifiesto en este documento mi voluntad de ceder a la Universidad Tecnológica de Bolívar los derechos patrimoniales, consagrados en el artículo 72 de la Ley 23 de 1982 sobre Derechos de Autor, del trabajo final denominado “**ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD EN LOS EQUIPOS DE BOMBEO DE AGUA CRUDA EN LA EMPRESA ACUACAR S.A.**” producto de mi actividad académica para optar el título de **Especialista en Gerencia de Mantenimiento** de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

La Universidad Tecnológica de Bolívar, entidad académica sin ánimo de lucro, queda por lo tanto facultada para ejercer plenamente los derechos anteriormente cedidos en su actividad ordinaria de investigación, docencia y extensión. La cesión otorgada se ajusta a lo que establece la Ley 23 de 1982. Con todo, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada con arreglo al artículo 30 de la Ley 23 de 1982. En concordancia suscribo este documento que hace parte integral del trabajo antes mencionado y entrego al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica de Bolívar.



Roberto Rafael Curiel Campillo

C.C. 73078491 de Cartagena

CESIÓN DE DERECHOS PATRIMONIALES

Cartagena de Indias D. T. y C., 13 de Diciembre de 2010

Yo, **Gonzalo Alberto Padilla Cantillo**, manifiesto en este documento mi voluntad de ceder a la Universidad Tecnológica de Bolívar los derechos patrimoniales, consagrados en el artículo 72 de la Ley 23 de 1982 sobre Derechos de Autor, del trabajo final denominado “**ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD EN LOS EQUIPOS DE BOMBEO DE AGUA CRUDA EN LA EMPRESA ACUACAR S.A.**” producto de mi actividad académica para optar el título de **Especialista en Gerencia de Mantenimiento** de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

La Universidad Tecnológica de Bolívar, entidad académica sin ánimo de lucro, queda por lo tanto facultada para ejercer plenamente los derechos anteriormente cedidos en su actividad ordinaria de investigación, docencia y extensión. La cesión otorgada se ajusta a lo que establece la Ley 23 de 1982. Con todo, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada con arreglo al artículo 30 de la Ley 23 de 1982. En concordancia suscribo este documento que hace parte integral del trabajo antes mencionado y entrego al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

Gonzalo Padilla.

Gonzalo Alberto Padilla Cantillo

C.C. 72236724 de Barranquilla

Cartagena de Indias D. T. y C., 13 de Diciembre de 2010

Señores:

Comité Evaluador

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Universidad Tecnológica De Bolívar

Ciudad.

Apreciados señores:

Por medio de la presente me permito informarles que el Trabajo Final Integrador titulado **“ANALISIS DE CONFIABILIDAD EN LOS EQUIPOS DE BOMBEO DE AGUA CRUDA EN LA EMPRESA ACUACAR S.A.”** ha sido desarrollado de acuerdo a los objetivos establecidos por la Especialización de Gerencia en Mantenimiento.

Como director del proyecto considero que el trabajo es satisfactorio y amerita ser presentado para su evaluación.

Atentamente

MSc, ME Alfredo Miguel Abuchar Curi
Director Trabajo Final Integrador

*A Dios por ser mi guía y protector,
A mis padres, por darme todo lo que soy,
y por su esfuerzo al educarme,
A mi esposa, por su constante apoyo
A mis hijos, por su amor incondicional
e inolvidables momentos de alegría.*

Gonzalo Alberto Padilla Cantillo

A Dios por ser el ser superior que siempre me ha acompañado y guiado en todas mis actuaciones, A mi esposa, por el apoyo y amor incondicional que siempre me ha brindado, A mis hijas por su constante amor, apoyo y respeto, A la memoria de mis padres por todo sus esfuerzos que realizaron para educarme.

Roberto Rafael Curiel Campillo

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

La empresa ACUACAR S.A., por todo su apoyo en la recopilación y suministro de la información necesaria para el desarrollo de este trabajo.

Al cuerpo de docentes de la Especialización en Gerencia de Mantenimiento, por los conocimientos transmitidos y por sus valiosos consejos.

A todos los compañeros de la Especialización, por permitirnos crecer como personas y compartir con nosotros sus valiosas experiencias.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	3
IDENTIFICACION DEL PROBLEMA.....	5
OBJETIVOS	6
JUSTIFICACION	7
1 MARCO ORGANIZACIONAL	8
1.1 RESEÑA HISTÓRICA.....	8
2 SISTEMA DE BOMBEO	13
2.1 COMPONENTES DEL SISTEMA DE BOMBEO	15
2.1.1 Captación	15
2.1.2 Bombeo	18
2.1.3 Transporte	28
3 MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD RCM [□]	33
3.1 METODOLOGIA RCM [□]	34
3.1.1 Contexto operacional y funciones.....	35
3.1.2 Fallas funcionales.....	38
3.1.3 Modos de falla	39

3.1.4	Consecuencias de las fallas	40
3.2	ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD	50
3.2.1	Estimación de la No Confiabilidad $F(t)$ y de la Mantenibilidad $M(t)$	52
3.3	ANÁLISIS DE CRITICIDAD.....	65
4	IMPLEMENTACION DEL MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD.....	69
4.1	ANÁLISIS PRELIMINAR DE CRITICIDAD DE LAS ESTACIONES DE BOMBEO	69
4.2	ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD EN LA EBAC DOLORES	81
4.3	IMPLEMENTACION DE RCM EN LA EBAC DOLORES	94
4.3.1	Fases 1, 2, 3, 4 y 5: Listado de Equipos, Fronteras del sistema, Funciones de cada subsistema, listar las fallas funcionales y los modos de falla	95
4.3.2	Fases 6 y 7: Analizar los efectos y criticidad de las fallas y Seleccionar tareas <i>costo – efectivas</i> para evitar la falla	106
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	123
	BIBLIOGRAFIA	125

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Principales características de las Estaciones de Bombeo de Agua Cruda (EBAC)	18
Tabla 2. Criterios ponderados para el análisis de criticidad	67
Tabla 3. Condiciones asociadas a la falla en el sistema de bombeo	71
Tabla 4. Actividades de mantenimiento más relevantes	74
Tabla 5. Costos anuales de mantenimiento programado por estación, cifras en pesos m/c.	76
Tabla 6. Costos anuales de mantenimiento por unidad de bombeo, cifras en pesos m/c.	78
Tabla 7. Costos anuales de mantenimiento por tipo, cifras en pesos m/c.....	78
Tabla 8. Consumo de energía eléctrica por mes en cada estación.....	80
Tabla 9. Resumen criterios ponderados.....	80
Tabla 10. Listado de actividades de mantenimiento.....	82
Tabla 11. Lapsos de los estados <i>SoFu</i> y <i>SoFa</i>	85
Tabla 12. Alineación de datos de NO CONFIABILIDAD para Weibull.....	87
Tabla 13. Alineación de datos de MANTENIBILIDAD para Weibull.	88
Tabla 14. Parámetros de Weibull para la Confiabilidad.....	90
Tabla 15. Parámetros de Weibull para la Mantenibilidad.	90
Tabla 20. Funciones y fallas funcionales de los arrancadores.	97

Tabla 21. Funciones y fallas funcionales de los transformadores.	99
Tabla 22. Funciones y fallas funcionales de los motores.	101
Tabla 23. Funciones y fallas funcionales de las bombas.	104

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Organigrama de ACUACAR S.A.	10
Figura 2. Diagrama de bloques del sistema de bombeo	12
Figura 3. Diagrama de bloques del sistema de bombeo	13
Figura 4. Componentes del sistema de bombeo	15
Figura 5. Mapa de los puntos de captación y de las estaciones de bombeo	16
Figura 6. Intervalo P – F	43
Figura 7. Diagrama de decisión fallo oculto	46
Figura 8. Diagrama de decisión seguridad y medio ambiente.....	47
Figura 9. Diagrama de decisión consecuencias operacionales.....	48
Figura 10. Diagrama de decisión consecuencias no operacionales.....	49
Figura 11. Diagrama de <i>Perfil de Funcionalidad</i>	53
Figura 12. Curva de la Bañera o Curva de Davies.....	64
Figura 13. Diagrama de entradas y salidas del sistema de bombeo	96

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Disponibilidad Inherente	54
Ecuación 2. Porcentaje acumulado de falla, método <i>i-kaésimo</i>	55
Ecuación 3. Porcentaje acumulado de mantenibilidad, método <i>i-kaésimo</i>	56
Ecuación 4. Alineación de Weibull para la No confiabilidad, eje Y	56
Ecuación 5. Alineación de Weibull para la No confiabilidad, eje X.....	57
Ecuación 6. Alineación de Weibull para la Mantenibilidad, eje Y	57
Ecuación 7. Alineación de Weibull para la Mantenibilidad, eje X	57
Ecuación 8. Ajuste de la alineación.....	58
Ecuación 9. Error estándar del estimado	59
Ecuación 10. Coeficiente de determinación muestral.....	59
Ecuación 11. Coeficiente de correlación	60
Ecuación 12. Parámetro de escala de Weibull	60
Ecuación 13. Parámetro de forma de Weibull	61
Ecuación 14. Calculo del tiempo medio entre fallas	62
Ecuación 15. Calculo del tiempo medio para reparar	62
Ecuación 16. Calculo de la criticidad del equipo o sistema	66
Ecuación 17. Calculo de las consecuencias de las fallas.....	66

GLOSARIO

CABEZA DINÁMICA TOTAL: Es la altura total a que un líquido debe ser bombeado, considerando las pérdidas totales por fricción.

DÁRSENA: Parte resguardada artificialmente, construida a orillas de un río para ser utilizadas como de captación en los sistemas de bombeo, con el objetivo de retener los sólidos en suspensión en el agua a impulsar por bombeo a través de las tuberías.

DRAGADO: Proceso de mantenimiento (re limpieza de sedimentos), realizado a la dársena, con el fin de que continúen realizando su función primaria.

INTERRUPTORES DIRECTOS DE LÍNEA: Equipos con contactos fijos y móviles utilizados para cerrar circuitos eléctricos, en nuestro caso cierran el circuito que suministra energía a los motores que arrancan las bombas.

NIVEL DE TENSIÓN II: Es un voltaje al que los comercializadores de energía suministran energía a sus clientes (Ejemplo Nivel 1, Nivel 2, Nivel 3, Nivel 4, etc.), para nuestro caso nivel de tensión 2, es 13200 voltios.

MANIFOLD: Es una palabra del idioma inglés que se refiere a una tubería colectora donde descargan el líquido bombeado las bombas de una estación de bombeo.

MANJOLES DE INSPECCIÓN: Son estructuras fabricadas en concreto para localizar accesorios de tuberías como válvulas, uniones, codos, etc., de tal forma que puedan ser inspeccionadas (son como un registro sanitario, eléctrico, etc.)

PROTECCIÓN ANTI ARIETE: Protección utilizada en tuberías de impulsión y actúan cuando se corta súbitamente la energía que está elevando el fluido a través de la misma (tubería), con el fin que el retroceso por la gravedad del agua no produzca roturas.

TANQUES HIDRONEUMÁTICOS: Tanques que se llenan con parte líquida y parte de aire comprimido para conformar la protección anti ariete descrita anteriormente.

TORRES DE ALIVIO: Utilizadas perpendicularmente sobre la parte superior de tuberías, con el fin de evacuar agua por las mismas.

VÁLVULAS DE DRENAJE: Válvulas utilizadas en tubería de gran diámetro para sacarles el agua que queda en ellas cuando se van a reparar. Ejemplo, las válvulas que tienen los tanques para drenar el líquido contenido entre ellos.

VÁLVULAS DE INTERCONEXIÓN: Utilizadas para hacer la interconexión entre varias tuberías (Cuando se deriva una tubería de otra principal, antes de su instalación se instala una válvula en línea con la misma)

VÁLVULAS EN LÍNEA: Válvulas instaladas en una tubería de gran longitud para cortar el fluido hasta donde se encuentra instalada cuando esta se cierra. Ejemplo, la tubería de la ducha, tiene una válvula instalada en línea para cortar el flujo de agua.

VÁLVULAS VENTOSAS: Válvulas automáticas que actúan en las grandes tuberías ya sea evacuando/aspirando el aire contenidas en la misma. Son la protección de la tubería contra sobre o sub-presiones.

RESUMEN

TITULO:

ANALISIS DE CONFIABILIDAD EN LOS EQUIPOS DE BOMBEO DE AGUA CRUDA EN LA EMPRESA ACUACAR S.A. *

AUTORES:

ROBERTO RAFAEL CURIEL CAMPILLO, GONZALO ALERTO PADILLA CANTILLO **

PALABRAS CLAVES:

Distribución, Weibull, Criticidad, Confiabilidad, Mantenibilidad, Disponibilidad, ACUACAR S.A.

DESCRIPCIÓN:

En el presente trabajo, se identifican cuáles son los equipos críticos de una de las estaciones de bombeo de agua cruda de la empresa ACUCAR S.A., con el objetivo de realizarle un análisis de confiabilidad a uno de estos equipos, como parte de una propuesta de implementación de una táctica de mantenimiento adecuada para la compañía.

Se inicia el trabajo con una descripción de la compañía y de los equipos involucrados en el sistema de bombeo de agua cruda; y luego se continúa con un marco conceptual de los temas a tratarse en el desarrollo del trabajo, con el propósito de contextualizar al lector. Por último, se realiza el análisis pertinente y la aplicación de la táctica de mantenimiento a la estación de bombeo. Se hacen observaciones y conclusiones.

* Trabajo final Integrador.

** Especialización en Gerencia de Mantenimiento.

INTRODUCCIÓN

El servicio de bombeo de agua cruda para la ciudad de Cartagena, presenta unas características geográficas y técnicas como la de ser un servicio para un importante destino turístico del país y la lejanía a las fuentes de captación de agua, que hace indispensable su constante modernización y adecuación a los diferentes estándares e indicadores internacionalmente reconocidos. En esta medida, la confiabilidad de dicho servicio, debe ser medida, controlada y optimizada bajo los lineamientos tácticos ya establecidos. Por lo tanto, el análisis de confiabilidad del sistema de bombeo, nos dará la información necesaria para orientar las acciones de mantenimiento hacia aquellos subsistemas críticos en la prestación de este servicio. Es de recalcar la ausencia o escasos de estudios en el tema y la adopción de una táctica basada formalmente en indicadores de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad (CMD).

En la empresa ACUACAR S.A. encontramos la oportunidad de realizar un estudio en el área de la ingeniería de confiabilidad, ya que en esta compañía dicho tema es muy incipiente, lo que hace bastante atractivo desarrollar la investigación y el análisis de estos temas de mantenimiento.

Consecuentemente, la aplicación de metodologías de mantenimiento basadas en indicadores CMD, Análisis de Modos de Falla y funciones de distribución; genera un valor agregado al objetivo de mejoramiento continuo de la compañía, ya que se cuenta con criterios con contenidos científicos y tecnológicos para respaldar las acciones de mantenimiento a realizar.

IDENTIFICACION DEL PROBLEMA

El servicio de bombeo de agua cruda para la ciudad de Cartagena, presenta unas características geográficas y técnicas como la de ser un servicio para un importante destino turístico del país y la lejanía a las fuentes de captación de agua, que hace indispensable su constante modernización y adecuación a los diferentes estándares e indicadores internacionalmente reconocidos. En esta medida, la confiabilidad de dicho servicio, debe ser medida, controlada y optimizada bajo los lineamientos tácticos ya establecidos. Por lo tanto, el análisis de confiabilidad del sistema de bombeo, nos dará la información necesaria para orientar las acciones de mantenimiento hacia aquellos subsistemas críticos en la prestación de este servicio. Es de recalcar la ausencia o escasos de estudios en el tema y la adopción de una táctica basada formalmente en indicadores de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad (CMD).

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Establecer acciones de mantenimiento dirigidas a mejorar la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de los equipos de bombeo de aguas crudas de la empresa ACUACAR S.A.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar el estudio de criticidad de los equipos del sistema de bombeo con el fin de seleccionar los equipos más críticos.

- Analizar los indicadores de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad para los equipos de bombeo seleccionados.

- Aplicar la táctica de RCM Y Análisis de Modo de Fallas a los equipos de bombeo seleccionados con el fin de aumentar sus indicadores de CMD.

JUSTIFICACION

En la empresa ACUACAR S.A. encontramos la oportunidad de realizar un estudio en el área de la ingeniería de confiabilidad, ya que en esta compañía dicho tema es muy incipiente, lo que hace bastante atractivo desarrollar la investigación y el análisis de estos temas de mantenimiento. Consecuentemente, la aplicación de metodologías de mantenimiento basadas en indicadores CMD, análisis de FMECA y funciones de distribución; genera un valor agregado al objetivo de mejoramiento continuo de la compañía, ya que se cuenta con criterios con contenidos científicos y tecnológicos para respaldar las acciones de mantenimiento a realizar.

1 MARCO ORGANIZACIONAL

1.1 RESEÑA HISTÓRICA¹

El día 23 de diciembre de 1992, la antigua “Empresas Públicas Municipales de Cartagena” se transformó en la “Empresa Industrial y Comercial de Servicios Públicos Distritales de Cartagena”. El Concejo Distrital de Cartagena de Indias, mediante el Acuerdo 05 del 1º de marzo de 1994, dispuso de la disolución y liquidación de esta última empresa, ordenando que sus activos e infraestructura pasaran a manos del Distrito de Cartagena; adicionalmente, autorizó al Alcalde Mayor de la época, mediante la *Resolución No 1787 del 23 de Septiembre de 1994*², a que constituyera la sociedad de economía mixta que se llamaría “Aguas de Cartagena S.A. E.S.P. –ACUACAR–”, que finalmente se constituyó mediante escritura del 30 de diciembre de 1994³.

El día 25 de junio de 1995 el gerente liquidador, hizo la entrega de los bienes al representante de ACUACAR, iniciando así, operaciones en la ciudad a mediados de 1995 y logrando una transformación en el manejo del acueducto y

¹ <http://www.acuacar.com/?q=historia>

² Expedida por la Alcaldía Distrital de Cartagena.

³ Notaría Segunda de Cartagena, otorgada el 30 de diciembre de 1994 y registrada en la Cámara de Comercio el 19 de enero de 1995.

alcantarillado en la capital del Departamento de Bolívar. ACUACAR está organizada bajo la modalidad de Sociedad Anónima, con fundamento en el *Ley 142 de 1994*⁴ y en cumplimiento del Acuerdo 05/94, del Concejo Distrital de Cartagena.

Han transcurrido casi 15 años de gestión, alcanzando significativos logros con el mejoramiento continuo del sistema de acueducto y alcantarillado, incorporando modernas tecnologías en su operación, con una gran recuperación y crecimiento de su infraestructura. Además, está llevando a cabo un proceso conducente a sanear los cuerpos internos de agua de la ciudad y realizando una gestión permanente de capacitación y desarrollo de su personal.

Aguas de Cartagena fue la primera empresa de Servicios Públicos Domiciliarios en Latinoamérica en certificar en 1998 su Sistema de Gestión de Calidad de conformidad con la Norma ISO 9001, hoy en día actualizada con la versión 2000, como también se convirtió en la primera empresa de Servicios Públicos Domiciliarios en Colombia en certificar su Sistema de Gestión Ambiental, bajo la norma ISO 14001/96, hoy renovado con la versión 2004.

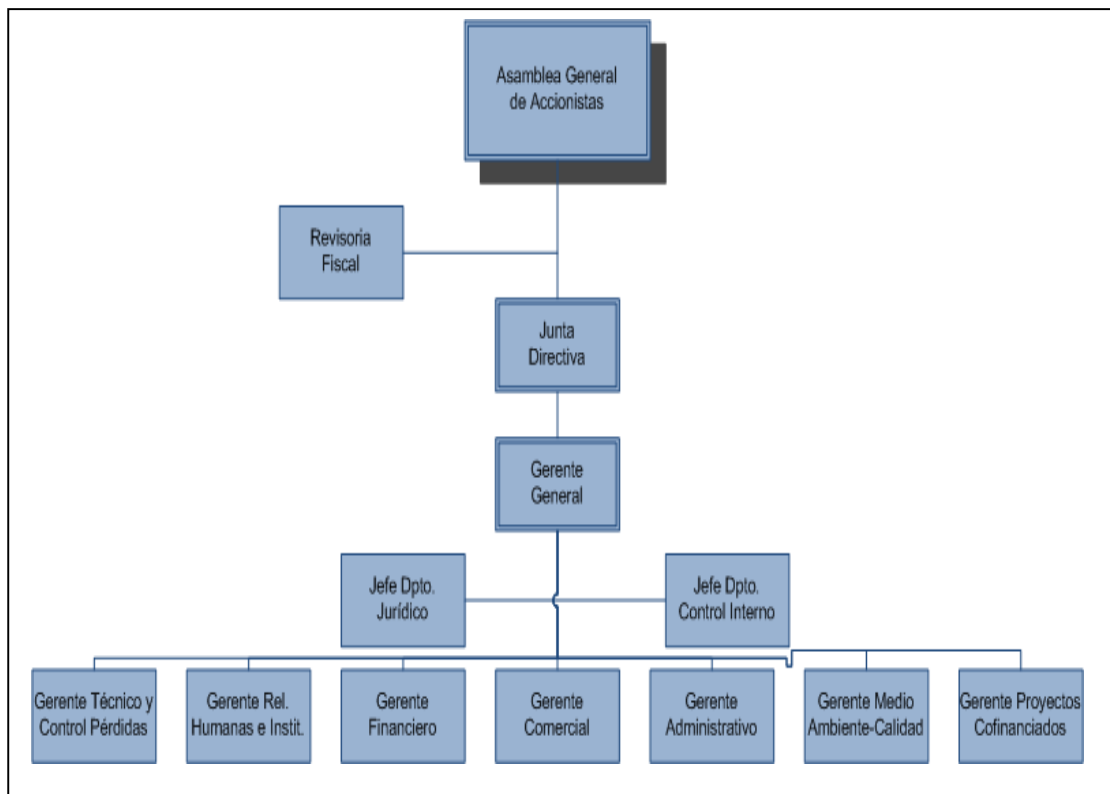
Actualmente la Empresa atiende a más de 180.000 usuarios del servicio de acueducto, con una cobertura de agua potable superior al 99% y de alcantarillado de más del 82.41%; una continuidad en el servicio de casi el 100%, adecuadas

⁴ Ley de servicios públicos domiciliarios

presiones en las redes y con una calidad de agua que cumple los estándares internacionales.

1.2 ORGANIGRAMA DE LA EMPRESA

Figura 1. Organigrama de ACUACAR S.A.
Fuente: Autores



1.3 MISIÓN

Aguas de Cartagena S.A E.S.P., contribuye con el mejoramiento de la calidad de vida de la comunidad, mediante la prestación eficiente de los servicios de acueducto, alcantarillado sanitario y actividades complementarias, con un equipo humano y técnico de la más alta calidad.

1.4 VISIÓN

En el año 2014 seremos una empresa reconocida como líder en la gestión de los servicios de acueducto y alcantarillado sanitario, por la calidad y eficiencia de nuestros procesos, soportada en una infraestructura confiable, consolidada financieramente y con un equipo humano competente y comprometido.

1.5 MAPA DE PROCESOS ACUACAR S.A.

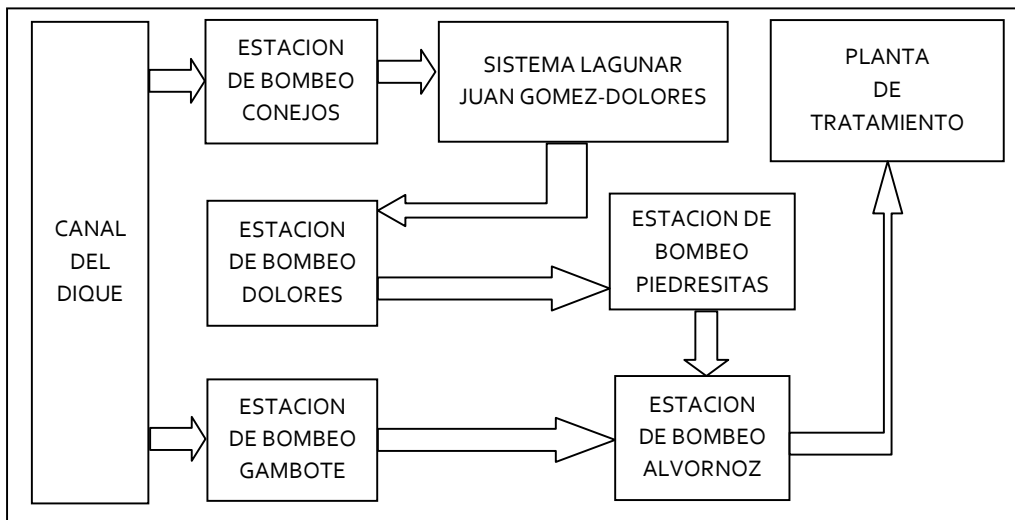
Figura 2. Diagrama de bloques del sistema de bombeo
Fuente: Gerencia ACUACAR S.A.



2 SISTEMA DE BOMBEO

El acueducto de Cartagena está conformado por dos sistemas de bombeo independientes llamados: *Gambote* y *Dolores*. Ambos sistemas, captan el agua cruda desde el Canal del Dique, principal fuente de agua de la ciudad de Cartagena, y la transportan hacia la planta de tratamiento El bosque, ubicada⁵ en las inmediaciones de la loma del Marión del barrio Paraguay de la ciudad de Cartagena, a 47 metros sobre el nivel del mar, (msnm).

Figura 3. Diagrama de bloques del sistema de bombeo
Fuente: Autores



⁵ km37+700

La estación de bombeo Dolores, se encuentra ubicada en el corregimiento de Puerto Badel, su nombre se debe al hecho de tener su bocatoma ubicada en la Ciénaga de Dolores. Cuenta con la ayuda de *la estación de bombeo Conejos*, que se encarga de mantener el nivel adecuado del líquido en el sistema lagunar Juan Gómez-Dolores, de esta manera se garantiza que se pueda captar y bombear el agua desde Dolores. Ambas estaciones de bombeo, Dolores y Conejo, proveen cerca del 86 % del agua a la planta de tratamiento.

El agua cruda captada en la Ciénaga de Dolores, es bombeada y transportada hacia la *dársena* de una estación de bombeo intermedia denominada *Piedrecitas*, ésta a su vez, impulsa el agua desde una laguna de sedimentación hacia otra estación de bombeo intermedia llamada *Albornoz*.

La estación de bombeo intermedia Albornoz, está localizada en el barrio Albornoz, sector Arroz Barato⁶. Es donde convergen y se mezclan las aguas procedentes de las estaciones de bombeo de Gambote y Dolores. Esta estación, tiene una *dársena* que almacena agua cruda con reservas para unas 8 horas de consumo normales y es la encargada de bombear el agua cruda hacia la planta de tratamiento.

Por otro lado, *la estación de bombeo Gambote*, lleva ese nombre debido a que su bocatoma de captación se localiza en el poblado de Gambote, sobre el Canal del Dique. Desde la captación, se bombea el agua hacia la estación intermedia de

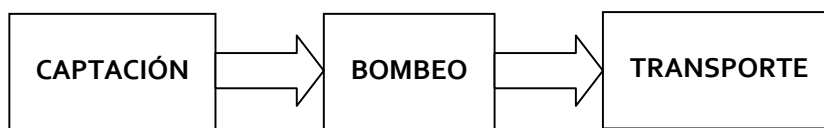
⁶ km31+565 de la conducción Dolores-Cartagena.

Albornoz, suministrando de esta forma, la estación de Gambote, el 14 % del caudal de agua cruda que llega a la planta de tratamiento.

2.1 COMPONENTES DEL SISTEMA DE BOMBEO

El sistema de bombeo utilizado para suministrar el agua cruda desde el canal del Dique hasta las Plantas de Tratamiento, consta de tres etapas, las cuales son: *Captación, Bombeo y Transporte de Agua Cruda.*

Figura 4. Componentes del sistema de bombeo
Fuente: Autores



2.1.1 Captación

Este proceso se realiza en dos puntos diferentes del canal del dique, el primer punto de captación, llamado *Gambote*, está localizado en el kilómetro, (km) 66+000 de este canal; y el segundo punto, denominado *Santa Elena*⁷, se encuentra localizado en el km 82+000 del mismo canal, pero aguas arriba.

⁷ Estación de bombeo Conejos

aquellas partículas en suspensión, con suficiente peso, tienden a depositarse en el fondo de la dársena por el proceso natural de sedimentación.

Adicionalmente, en cada uno de estos puntos de captación, también se encuentran las piscinas para el vertimiento de *sedimentos*⁸, las cuales tienen la suficiente capacidad para almacenar todo el sedimento extraído durante el proceso de *dragado*, que se realiza de forma regular, una vez cada año.

La producción anual aproximada de sedimentos en Gambote y Conejos, es de unos 15,000 m³ y 120,000 m³, respectivamente. Normalmente, la tarea de extracción de estos sedimentos se realiza durante los primeros tres meses del año, periodo en el cual, empiezan a descender los niveles del canal del dique a causa del verano.

Los equipos utilizados para el dragado de las dársenas y para la limpieza de las piscinas de vertimiento son:

- ✓ Dragas entre 10 pulgadas y 16 pulgadas de succión-impulsión.
- ✓ Equipos Buldócer y Retroexcavadoras sobre orugas.
- ✓ Tuberías para descargue de sedimentos en piscinas.
- ✓ Volquetas.

⁸ Material sólido que se posa en el fondo de la dársena tras el proceso de sedimentación.

2.1.2 Bombeo

Debido a las grandes distancias que existen entre los puntos de captación del agua cruda y la planta de tratamiento; se hace necesario el uso de bombas centrífugas. Estas, son accionadas por motores asíncronos con potencias comprendidas entre 150 *horsepower*, (HP); y 1500 HP.

Tabla 1. Principales características de las Estaciones de Bombeo de Agua Cruda (EBAC)
Fuente: Autores

EBAC CONEJOS							
BOMBAS							
EQUIPO	MARCA	Q(m ³ /h)	H(m)	POT(HP)	TIPO	RPM	PRESION DE TRABAJO kg/cm ² (m)
Bomba 1	SULZER	6480	4.48	126.35	Axial	595	NA(1)
Bomba 2	SULZER	6480	4.48	126.35	Axial	595	NA(1)
Bomba 3	LAYNE & BOWLER	6480	4.48	125.00	Axial	586	NA(1)
Bomba 4	LAYNE & BOWLER	6480	4.48	125.00	Axial	586	NA(1)
MOTOR							
EQUIPO	MARCA	POT(HP)		AMP	VOLT		
Motor 1	ABB	147.8		245	440		
Motor 2	ABB	147.8		245	440		
Motor 3	US MOTORS	125		164	460		

Motor 4	US MOTORS	125	164	460			
TRANSFORMADOR							
EQUIPO	MARCA	POT(KVA)	VOLT	I Secundario (AMP)	I Primario (AMP)		
Transformador 1	ABB	630	13200/460	792.5	27.5		
EBAC DOLORES							
BOMBAS							
EQUIPO	MARCA	Q(m ³ /h)	H(m)	POT(HP)	TIPO	RPM	PRESION DE TRABAJO (kg/cm ²)
Bomba 1	SULZER	3333	95	1461.60	Vertical 2 impulsores	893	8.5
Bomba 2	VERTI LINE	3333	93.5	1500	Vertical 3 impulsores	1200	
Bomba 3	VERTI LINE	3333	93.5	1500	Vertical 3 impulsores	1185	
Bomba 4	AURORA	3333	93.5	1500	Vertical 3 impulsores	1170	
Bomba 5	AURORA	2112.5	93.5	1500	Vertical 3 impulsores	1185	
Bomba 6	VERTI LINE	3333	93.5	1500	Vertical 3 impulsores	1200	
MOTOR							
EQUIPO	MARCA	POT(HP)	AMP	VOLT			
Motor 1	ABB	1500	186	4160			
Motor 2	General Elc.	1500	185	4160			
Motor 3	US MOTORS	1500	190	4160			
Motor 4	US MOTORS	1500	190	4160			
Motor 5	US MOTORS	1500	188	4160			
Motor 6	General Elc.	1500	185	4160			

TRANSFORMADOR							
EQUIPO	MARCA	POT(KVA)	VOLT	I Secundario (AMP)	I Primario (AMP)		
Transformador 1	SIEMENS	5000	34500/4160	694	83,7		
Transformador 2	ABB	6000	34500/4160	832	100		
EBAC PIEDRECITAS							
BOMBAS							
EQUIPO	MARCA	Q(m ³ /h)	H(m)	POT(HP)	TIPO	RPM	PRESION DE TRABAJO kg/cm ² (m)
Bomba 1	EBARA	2016	72	751	Horizontal carcasa partida	1190	6 (59.88)
Bomba 2	EBARA	2016	72	751	Horizontal carcasa partida	1190	6 (59.88)
Bomba 3	EBARA	2016	72	751	Horizontal carcasa partida	1190	6 (59.88)
Bomba 4	EBARA	2016	72	751	Horizontal carcasa partida	1190	6 (59.88)
Bomba 5	EBARA	2016	72	751	Horizontal carcasa partida	1190	6 (59.88)
Bomba 6	EBARA	2016	72	751	Horizontal carcasa partida	1190	6 (59.88)
MOTOR							
EQUIPO	MARCA	POT(HP)		AMP	VOLT		
Motor 1	YASKAWA	751		91	4160		
Motor 2	YASKAWA	751		91	4160		
Motor 3	YASKAWA	751		91	4160		
Motor 4	YASKAWA	751		91	4160		
Motor 5	YASKAWA	751		91	4160		

Motor 6	YASKAWA	751	91	4160			
TRANSFORMADOR							
EQUIPO	MARCA	POT(KVA)	VOLT	I Secundario (AMP)	I Primario (AMP)		
Transformador 1	TPL	4000	34500/4160	555	66,93		
Transformador 2	TRAFON UNION	5000	34500/4160	694	83,7		
EBAC ALBORNOZ							
BOMBAS							
EQUIPO	MARCA	Q(m ³ /h)	H(m)	POT(HP)	TIPO	RPM	PRESION DE TRABAJO kg/cm ² (m)
Bomba 1	PEERLESS	2508	70	800	Vertical 2 impulsores	1180	7 (69.86)
Bomba 2	AURORA	2500	70	800	Vertical 2 impulsores	1170	7 (69.86)
Bomba 3	PEERLESS	2508	70	800	Vertical 2 impulsores	1180	7 (69.86)
Bomba 4	AURORA	2500	70	800	Vertical 2 impulsores	1170	7 (69.86)
Bomba 5	SULZER	2500	70,7	800	Vertical 2 impulsores	1191	7 (69.86)
MOTOR							
EQUIPO	MARCA	POT(HP)	AMP	VOLT			
Motor 1	US MOTORS	800	94	4600			
Motor 2	US MOTORS	800	94	4600			
Motor 3	US MOTORS	800	94	4600			
Motor 4	US MOTORS	800	94	4600			
Motor 5	ABB	800	90,1	4600			
TRANSFORMADOR							

EQUIPO	MARCA	POT(KVA)	VOLT	I Secundario (AMP)	I Primario (AMP)		
Transformador 1	SIERRA	3500	13200/4600	439	153		
Transformador 2	SIERRA	3500	13200/4600	439	153		
EBAC GAMBOTE							
BOMBAS							
EQUIPO	MARCA	Q(m ³ /h)	H(m)	POT(HP)	TIPO	RPM	PRESION DE TRABAJO kg/cm ² (m)
Bomba 1	AMERICAN MARSH	625	103	700	Vertical 4 impulsores	1150	9.5 (94.81)
Bomba 2	AMERICAN MARSH	625	103	700	Vertical 4 impulsores	1150	9.5 (94.81)
MOTOR							
EQUIPO	MARCA	POT(HP)	AMP	VOLT			
Motor 1	US MOTORS	525	87	440			
Motor 2	US MOTORS	525	87	440			
TRANSFORMADOR							
EQUIPO	MARCA	POT(KVA)	VOLT	I Secundario (AMP)	I Primario (AMP)		
Transformador 1	SIEMENS	2500	13200/4330	333	109		

A continuación, se da una breve descripción de las diferentes estaciones que conforman el sistema de bombeo:

- **Estación de bombeo Gambote**

Este sistema de bombeo fue construido para el año de 1960, y consta de (2) juegos de unidades de bombeo idénticas, marca *American Marsh*. Desde la captación en Gambote, en condiciones normales de operación, se impulsa el agua cruda mediante una de las dos bombas hacia el embalse de la estación de bombeo Albornoz, ubicada a 39 km; con caudales de 33.000 metros cúbicos/día, (m^3/d); y una *cabeza dinámica total* de 103 metros, (m).

Los motores de estas bombas, tienen potencias de 700 HP, arrancados por *interruptores directos de línea*. El suministro de energía a este punto se realiza a *nivel de tensión 11^o* , mediante una subestación de transformación de 2.5 megavoltampere, (MVA), 13200/4160 volts.

- **Estación de bombeo Conejos**

Su construcción fue realizada en el año 1997. Está localizada en el km 82 del canal del dique y su función principal es abastecer, con agua del canal, al sistema lagunar Juan Gómez-Bohórquez-Dolores. Su operación no está programada para una fecha definida; pero generalmente entra en funcionamiento cuando el nivel del

⁹ 13200 volts

canal desciende a un valor inferior al del sistema lagunar, que es cuando se interrumpe el suministro de agua por gravedad hacia este último.

El equipo de bombeo lo conforman (4) unidades tipo vertical que impulsan caudales cada una de 156.000 m³/d, con una cabeza dinámica total de 4.5 m. Los motores de accionamiento de estas bombas, son de una potencia de 150 HP a 460 volts, accionados por arrancadores de estado sólido. Su suministro de energía es entregado a través de una subestación transformadora de 630 KVA, 13200/460 volts.

El agua impulsada se descarga directamente a canales artificiales a cielo abierto, los cuales se comunican por gravedad directamente al sistema lagunar.

▪ **Estación de bombeo Dolores**

El bombeo de Dolores fue construido en 1970. Permanece en funcionamiento durante las veinticuatro horas del día, para lo cual las cámaras de aducción donde están sumergidas sus bombas deben tener niveles adecuados para este fin.

Este bombeo está conformado por (6) bombas con capacidades de 80.000 m³/d, cada una, y cabezas dinámicas de 72 m. Las cuales se encuentran divididas en diferentes edificios, en grupos de tres unidades. Impulsan el agua hacia la misma

conducción; pero a través de *manifold*¹⁰ distintos de descargas; configuración que ofrece gran confiabilidad al bombeo continuo desde esta estación.

En condiciones normales de operación, el bombeo funciona con (3) unidades; con las cuales se impulsa el caudal directamente hasta la estación de re-bombeo denominada *Piedrecitas*.

Las seis bombas, son accionadas por motores asíncronos con características 1500 HP, 4160 volts y 1190 rpm. El arranque a los motores se efectúa directo de línea con interruptores que hacen la ruptura del arco en cámaras de gas SF6.

El suministro de energía a este bombeo se realiza a través de dos transformadores de potencia con capacidades de 5 MVA y 6 MVA, que transforman la energía recibida de 34.5 kilovolts, (kV) a 4.16 kV, el cual es el voltaje de funcionamiento de todos los motores de esta estación.

La capacidad de cada uno de los transformadores es suficiente para accionar tres unidades de bombeo, simultáneamente, siendo este, otro aspecto técnico que garantiza la confiabilidad del bombeo continuo desde esta estación.

¹⁰ Tubería colectora donde descargan el líquido bombeado las bombas de una estación de bombeo.

- **Estación de bombeo Piedrecitas**

Fue construida en el año 1985 y está constituida por (6) unidades idénticas, de las cuales en condiciones normales de funcionamiento solo trabajan un máximo de cuatro. Tienen capacidades de 48.000 m³/d, con una cabeza dinámica total de 72 m, las cuales giran a velocidades próximas a 1200 rpm. Succionan el agua para el bombeo de un tanque a cielo abierto que tiene una capacidad de 8000 m³, y la descargan a un menifold en acero al carbón de 36 pulgadas.

Los motores que accionan estas bombas son asíncronos horizontales y se alimentan con energía a 4160 volts, para desarrollar una potencia máxima en su eje de 750 HP. Son accionados a tensión reducida mediante el método de autotransformador con un 65% de la tensión nominal entre líneas. Actualmente, la capacidad de transformación de la estación es de 9 MVA, constituida por dos transformadores de 5 y 4 MVA, los cuales cada uno de estos es capaz de soportar la carga de todo el equipo de bombeo.

Desde este sistema de bombeo se impulsan diariamente aproximadamente 220.000 m³ de agua, los cuales son distribuidos en porcentajes de 20 % y 80 %, a la zona industrial de Mamonal y al embalse de Albornoz, respectivamente.

- **Estación de Bombeo Albornoz**

Este sistema está constituido por la estación que lleva el mismo nombre, la cual fue construida en 1979. La conforman (5) unidades verticales de las cuales en condiciones normales de operación funcionan solo cuatro, las cuales impulsan hacia la planta de tratamiento de Cartagena localizada en el barrio El Paraguay unos 220.000 m³/día, aproximadamente. Sus placas características indican caudales de 60.000 m³/día, cabeza dinámica total de 103 m y velocidades próximas a 1200 rpm. El agua a impulsar por estas unidades, es succionada de un embalse a cielo abierto con capacidad de 85.000 m³; para luego ser descargada, en grupos de dos y tres unidades, a diferentes menifold que se interconectan entre sí a pocos metros mediante la operación de válvulas de aislamiento.

Los motores que accionan estas bombas son asíncronos verticales con potencias de 800 HP, a 4600 volts y 1190 rpm. Son arrancados directamente de línea mediante interruptores con ruptura del arco en gas SF6. El suministro de energía eléctrica se efectúa a través de dos transformadores de potencia idénticos de 3.5 MVA cada uno, los cuales reciben el suministro de energía a 13.8 kV.

2.1.3 Transporte

El transporte del agua cruda se realiza a través de tuberías construidas con materiales como el hierro dúctil (HD), el ferro concreto y la fibra de vidrio. Durante el recorrido del agua transportada, existen embalses a cielo abierto donde se llevan cabo re-bombeos con el fin de obtener ganancias en las velocidades, presiones y caudales del agua.

A continuación, se describen las diferentes tuberías de conducción.

- **Conducción Dolores-Piedrecitas**

Instalada en el año de 1970, actualmente cuenta con una longitud total de 20.1 km, su fabricante es *American-Pipe de Colombia*¹¹, (AP). Está construida en concreto con un cilindro de acero de 45 pulgadas de diámetro, su presión de trabajo es de 130 libras por pulgada cuadrada, (psi); (91 m).

Con el fin de obtener un mayor caudal y garantizar una mayor confiabilidad en esta conducción, en el año 1998 se procedió a la instalación de un tramo de tubería en paralelo con la tubería existente de AP. La nueva tubería instalada en HD de 39 pulgadas de diámetro, cuenta con una longitud total de 4920 m a la

¹¹ <http://www.apci.com.co/net/>

fecha¹², a partir del km 15+280. El proyecto de *doblamiento*¹³ de esta conducción, contempla la instalación total de los 20.1 km de tubería que cubra la longitud Dolores-Piedrecitas.

A lo largo de esta conducción existen *válvulas en línea, válvulas de drenajes, válvulas ventosas, manjoles de inspección, torres de alivio y válvulas de interconexión*, para una correcta operación de la misma.

Para la protección *anti-ariete* de esta conducción, se encuentra instalada en la estación de bombeo Dolores, tres cámaras de aire consistentes en *tanques hidroneumáticos* de acero al carbón de 130 m³ de volumen cada uno.

- **Conducción Piedrecitas-Albornoz**

Esta conducción, a partir de su origen en Piedrecitas, está construida en tubería de concreto con cilindro de acero en 45 pulgadas; con una longitud total de 8,9 km. A partir de esta longitud, la conducción se reduce a un diámetro de 36 pulgadas, usando el mismo tipo de tubería; con una longitud de 2,7 km hasta llegar a la estación de Albornoz. Para una longitud total de la conducción Piedrecitas-Albornoz de 11,6 km.

¹² Abril de 2010.

¹³ Ampliación de la capacidad a través de una tubería paralela.

En el km 24+310 de esta conducción, se deriva una interconexión con una tubería en HD de 39 pulgadas, la cual hace su recorrido paralelamente hasta la estación de bombeo de Albornoz, con una longitud de 7,39 km. El proyecto del doblamiento de esta conducción, contempla la instalación de 11,6 km en tubería en HD de 39 pulgadas.

Para la protección anti-ariete de esta conducción, en la estación de bombeo de Piedrecitas se encuentran instalados dos tanques hidroneumáticos fabricados en acero al carbón de 185 m³ de volumen, cada uno.

Entre la conducción Piedrecitas-Albornoz, existe el mayor consumo de agua cruda en ruta conformado por la zona industrial de Mamonal; en donde, en promedio, se registran consumos diarios de 40.000 m³.

- **Conducción Albornoz-Estación de Tratamiento de Agua Potable (ETAP) El Bosque**

Tiene una longitud de 5,54 km, está conformada por una tubería de concreto con cilindro de acero en 36 pulgadas de diámetro. Paralelamente a la anterior tubería, existe también otra tubería de 39 pulgadas de diámetro; instalada en 1997 y fabricada en *GRP*¹⁴.

¹⁴ Material de fibra de vidrio con resina epoxica

Para su protección, se encuentran instalados en la estación de bombeo de Albornoz, dos tanques hidroneumáticos fabricados en acero al carbón con volúmenes de 70 m³ cada uno; y una *Almenara* de 310 m³, localizada en el km 0,32 de esta conducción, a la cual solo se encuentra conectada la tubería de acero en 36 pulgadas.

- **Conducción Gambote-Albornoz**

Está conformada por una tubería fabricada en concreto con cilindro de acero de 30 pulgadas de diámetro. Anteriormente su recorrido era Gambote-ETAP El Bosque, con una longitud de 41 km. Actualmente, su recorrido es Gambote-Albornoz en una longitud de 35,6 km.

Como consecuencia de la instalación de tuberías en HD y GRP, en paralelo con la conducción Dolores-ETAP El Bosque, esta conducción solo suministra un 13% del agua cruda total que llega al embalse de la estación Albornoz.

Entre la conducción Gambote-Albornoz se encuentran solo usuarios dedicados a la ganadería, zoo criaderos y agricultura. Además, existe abastecimiento de agua cruda a la planta de tratamiento de Turbaná, desde donde se suministra agua al municipio del mismo nombre y al corregimiento de Ballestas.

Debido al gran tiempo de servicio de esta conducción, aproximadamente unos 60 años, en la misma se han producido muchas averías por el deterioro del cilindro de acero. Para la protección de esta conducción, se encuentran instaladas válvulas de expulsión de aire y torres de alivio.

La Distribución de agua cruda se realiza directamente de las conducciones Dolores-Piedrecitas; Piedrecitas-Albornoz; Gambote-Albornoz y Albornoz-ETAP El Bosque.

Normalmente, existen registros desde 2 pulgadas hasta 12 pulgadas de diámetro, derivadas de las tuberías de gran tamaño; que suministran este servicio hasta los depósitos de los usuarios que están clasificados en ganaderías, agricultura, zoo criaderos, aviculturas e industriales y especialmente para acometidas domiciliarias.

Adicionalmente, también existen algunos corregimientos como: Rocha, Puerto Badel, El Pueblito, El Recreo en la conducción Dolores-Piedrecitas; que no son usuarios legales de este servicio.

3 MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD RCM ^[15]

Es una metodología utilizada para determinar sistemáticamente los requerimientos de mantenimiento de los equipos físicos, para que estos continúen cumpliendo con sus funciones, haciendo así lo requerido por el usuario.

El RCM se centra en la relación existente entre la organización y los elementos físicos que la componen; por lo tanto, el punto de partida para hacer el análisis de RCM es saber qué tipo de elementos físicos existen en la empresa. El principal producto que se obtiene de la aplicación de RCM, son planes de mantenimiento optimo, basados en las consecuencias que produce cada *modo de falla*. Es decir, que se logra una mayor relación costo – eficiencia, al focalizar la atención en aquellas actividades de mantenimiento que tienen mayor impacto en el desempeño del activo, asegurando que todo lo que se gasta en mantenimiento, se invierta en los procesos que pueden ofrecer los mejores resultados.

¹⁵ MARTÍNEZ T, Mary Carmen; AVILA, José; MILLÁN M. Miosotis. Confiabilidad Operacional en el Sistema de Microondas. Gerencia AIT Departamento de Planificación y Gestión. PDVSA Oriente. OROZCO M, Roberto C. Implementación del mantenimiento basado en la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad en Busca S.A. Monografía de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2009. p. 31.

Por otra parte, se logra una mayor seguridad e integridad ambiental, al considerarse las implicaciones ambientales y de seguridad de cada patrón de falla al igual que su efecto operacional.

La metodología de RCM se basa en siete preguntas claves:

1. ¿Cuáles son las funciones y estándares de ejecución?
2. ¿En qué forma se pierde la función o no se cumplen los estándares de ejecución?
3. ¿Qué causa cada falla funcional?
4. ¿Qué ocurre cuando sucede una falla?
5. ¿En qué sentido es importante cada falla?
6. ¿Qué puede hacerse para prevenir cada falla funcional?
7. ¿Qué puede hacerse si no se conoce forma alguna de prevención?

3.1 METODOLOGIA RCM ^[16]

El objetivo del RCM no es conservar la condición operativa de los equipos, sino garantizar que el equipo o sistema cumpla con la función o funciones para las cuales ha sido introducido en el proceso productivo. Es decir, que RCM se

¹⁶ MONTILLA M, Carlos A; ARROYAVE, Juan Felipe; SILVA M, Carlos Eduardo. Caso de aplicación de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad RCM, previa existencia de Mantenimiento Preventivo. Universidad Tecnológica de Pereira. Diciembre de 2007.

preocupa por garantizar la máxima confiabilidad de un proceso o equipo, entendiendo confiabilidad como la probabilidad que un equipo no falle durante su operación.

A continuación, se mencionan las distintas fases a seguir para la implementación del RCM y la información requerida para su suficiente comprensión.

- Fase 1: Seleccionar los equipos de objeto del estudio.
- Fase 2: Establecer las fronteras del sistema.
- Fase 3: Definir sus funciones.
- Fase 4: Listar las fallas funcionales.
- Fase 5: Determinar las causas de las fallas (modos de falla).
- Fase 6: Analizar los efectos y criticidad de las fallas.
- Fase 7: Seleccionar tareas *costo efectivas* para evitar la falla.
- Fase 8: Definir plan de mantenimiento.

3.1.1 Contexto operacional y funciones

Cada equipo dentro del sistema de bombeo, fue adquirido para cumplir con un propósito o funciones específicas. La pérdida total o parcial de dichas funciones afecta en mayor o menor medida la operación del sistema, dependiendo del *contexto operacional* en el que se encuentra.

Es de suponerse, que para poder iniciar con el análisis de RCM, es necesario establecer cuáles son las funciones y cuáles son los estándares que deben cumplir los diferentes elementos o equipos en su *contexto operacional*.

- **Contexto operacional**

Define en forma precisa todos los elementos que serán considerados en el análisis, desde la definición de las fronteras hasta los distintos activos o elementos que forman parte del sistema a evaluar, así como también, el régimen de operaciones al cual estará sujeto el activo.

Algunos de los factores importantes que se deben tener en cuenta dentro del contexto operacional son los siguientes:

- **Tipo de proceso que se maneja:** si es continuo o por lotes y aplica generalmente para planta manufactureras.
- **Redundancia:** establece criterios de mantenimiento para equipos de reserva.
- **Estándares de calidad del proceso:** establecen descripciones diferentes de funciones de maquinas que de otra forma serian idénticas.
- **Riesgos para la seguridad:** son estándares formales para la calificación de niveles de riesgos considerados aceptables.

- **Turnos de trabajo:** la organización por turnos de trabajo afecta de manera profunda el contexto operacional, dependiendo de la cantidad de horas que se laboren.
- **Tiempo de reparación:** se encuentra influido por la velocidad de respuesta a la falla, la cual a su vez se encuentra determinada por el sistema de reportes de falla, por el nivel del personal y por la velocidad de reparación de la misma.

- **Funciones**

Deben ser enfocadas, *a lo que los usuarios deseen* que realicen los sistemas o equipos. Lógicamente, se debe garantizar que dichos sistemas o equipos son capaces de realizar la función demandada por el usuario.

Se dividen en primarias, secundarias, dispositivos de seguridad y funciones superfluas; y su descripción está constituida por un verbo, un objeto y el estándar de desempeño deseado. Por esto, el primer paso en el proceso RCM es la definición de las funciones de cada activo en su contexto operacional junto con los parámetros de funcionamiento deseados (estándares).

Las funciones primarias de un elemento, son las razones por las que existe, de modo que es una tarea sencilla de identificar y de describir. Esta categoría de

funciones incluye temas como: *velocidad, producción, capacidad de carga, calidad del producto y servicio al cliente.*

Por otro lado, las funciones secundarias, suelen ser menos obvias que las funciones primarias; pero su falla puede traer graves consecuencias, a veces más graves que la falla de la función primaria. Frecuentemente, las funciones secundarias están relacionadas con algunas de las siguientes funciones: *contener, soporte estructural, aspecto, higiene, monitoreo de variables físicas, etc.*

3.1.2 Fallas funcionales

Una vez que las funciones y estándares de cada equipo hayan sido definidos, el paso siguiente es identificar cómo puede cada elemento o equipo dejar de realizar algunas de sus funciones. El único hecho que puede hacer que un activo no pueda desempeñarse en conformidad a los parámetros establecidos por los usuarios es alguna clase de falla.

Esto nos lleva al concepto de una falla funcional, que se define como la incapacidad de un elemento o subsistema de satisfacer un estándar de funcionamiento deseado.

3.1.3 Modos de falla

Son las razones que dan origen a las fallas funcionales. Son las condiciones que se presentan como: desgaste, fractura, pérdida de calibración, suciedad, atascamiento, error humano, error en el diseño, error en el proceso, etc. Es decir, lo que hace que la planta, subsistema o equipo, no realice la función deseada.

Cada falla funcional puede ser ocasionada por más de un modo de falla y cada modo de falla tendrá asociada ciertas consecuencias de la falla que ocasiona.

En RCM primero se identifican las circunstancias que llevaron a la falla y luego se pregunta qué eventos pueden causar que el activo falle.

Los modos de falla incluyen aquellos que han ocurrido en equipos iguales o similares; operando en el mismo contexto, fallas que actualmente están siendo tratadas por programas de mantenimiento ya existentes, así como fallas que aún no han ocurrido pero que son altamente probables bajo las condiciones de operación dadas.

De igual manera, se debería incluir las fallas causadas por errores humanos a sea en su operación o mantenimiento, errores en el diseño del equipo o sistema.

3.1.4 Consecuencias de las fallas

Cada una de las fallas afecta a la empresa de algún modo, dependiendo del área afectada; es decir, que puede verse afectado en diferentes aspectos de la compañía tales como: la calidad del producto, el servicio al cliente, la seguridad o el medio ambiente. Por lo tanto, si las consecuencias de una falla son “*serias*” haremos un gran esfuerzo para intentar evitarlas, mientras que si tiene consecuencias leves, quizás decidamos asumir el costo de estas y simplemente dejar que falle.

Uno de los puntos fuertes de RCM es que reconoce que las consecuencias de las fallas son más importantes que la falla en sí misma. La descripción de un efecto o consecuencia de la falla debe hacerse de tal manera que se describa el efecto de la falla como si no se estuviera haciendo algo para prevenirla, debe considerar que el resto de los elementos y dispositivos funcionan adecuadamente y tener la información necesaria para determinar consecuencias y tareas de mantenimiento.

El RCM categoriza las fallas de acuerdo a sus consecuencias en:

1. **Fallas ocultas:** Una función oculta es aquella cuya falla no es detectable por los operarios bajo condiciones normales de funcionamiento. La única consecuencia de una falla oculta es un riesgo mayor a que ocurra una falla múltiple con consecuencias serias y posiblemente catastróficas. La mayoría están asociadas con sistemas de protección sin seguridad inherente. El

esfuerzo que se ha de imprimir para evitar una falla oculta, dependerá de las consecuencias de la falla múltiple.

2. **Fallas con consecuencias ambientales y para la seguridad:** Son fallas que pueden provocar daños al ecosistema, infringir normas ambientales regionales, nacionales o internacionales; o producir lesiones o muerte a los seres humanos.
3. **Fallas con consecuencias operacionales:** Ocurren cuando existe afectación directa a la producción, (cantidad de producto, calidad del producto o servicio al cliente, costos).
4. **Fallas con consecuencias no operacionales:** Son aquellas que solo afectan el costo directo de la reparación, sin afectar la producción ni la seguridad.

De acuerdo a las consecuencias de las fallas, se definirán unas tareas a realizar que busquen la mejor relación *Costo - Eficacia*. En mantenimiento, y por supuesto en RCM, se clasifica el manejo de las fallas de acuerdo al momento de su aparición, en dos tipos de acciones principalmente:

- **Acciones proactivas:** Son las que se realizan antes de que ocurra la falla. Abarcan lo que se conoce como el mantenimiento preventivo y predictivo. RCM define tres clases de tareas proactivas, (reacondicionamiento cíclico, sustitución cíclica y mantenimiento a condición).
- **Acciones correctivas:** Son aquellas que se realizan luego que ha ocurrido la falla por lo que están directamente relacionadas con el estado de la falla.

RCM define en este tipo de acciones, las tareas “*a falta de*” las cuales incluyen búsqueda de la falla, rediseño y operar hasta la falla.

De esta manera, las fallas con consecuencias leves o menores, pueden ser eximidas de mantenimiento proactivo. En cambio, aquellas cuyas consecuencias son considerables, debe hacerse “algo” para prevenir o predecir las fallas y mitigar sus consecuencias.

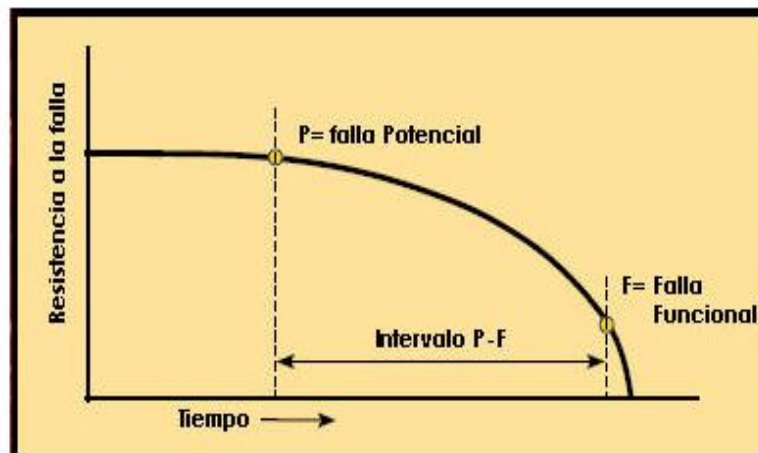
A continuación se describen las diferentes tareas Proactivas y “A falta de” que define RCM:

1. Tareas proactivas:

- **Tareas de reacondicionamiento cíclico:** Implica el re-trabajo de un componente o la reparación de un conjunto antes de un límite de edad específico sin importar su condición en ese momento.
- **Tareas de sustitución cíclica:** Implican sustituir un componente antes de un límite de edad específico, más allá de su condición en ese momento.
- **Tareas a condición:** La mayoría de las fallas muestran algún tipo de aviso antes de que ocurran y a estos avisos se les denomina *fallas potenciales*. Las fallas potenciales definen una serie de condiciones que son físicamente identificables y que al ser detectadas a tiempo (intervalo P-F), pueden ser tratadas mediante acciones preventivas. Esta categoría incluye al

mantenimiento predictivo, mantenimiento basado en la condición y monitoreo de la condición.

Figura 6. Intervalo P – F
Fuente: <http://confiabilidad.net>



2. Tareas “A falta de”:

- **Búsqueda de fallas:** Consiste en revisar si algo ha fallado en el equipo o sistema, se refiere más que todo a una función oculta. Diferente de buscar si algo está fallando.
- **Rediseño:** Implica hacer cambios en la capacidad del sistema o equipo. También puede incluir capacitación.
- **Operar hasta la falla:** Simplemente se permite que la falla ocurra y luego se repara.

RCM provee criterios simples, precisos y fáciles de entender para decidir cuál de las tareas de mantenimiento es *técnicamente factible* en el contexto operacional. Una tarea es técnicamente factible, si merece la pena hacerla; es decir, si por sí sola reduce el riesgo a un nivel muy bajo o directamente lo elimina con una razonable relación Costo – Eficiencia. De no hallarse una tarea proactiva técnicamente factible, entonces debe tomarse una acción “a falta de” adecuada.

El proceso de selección de tareas depende del punto en el que la planta puede quedar afectada debido a la falla, Y como se mencionó antes, las fallas se categorizan de acuerdo a sus consecuencias en fallas ocultas, ambientales y para la seguridad, operacionales y no operacionales.

Por lo tanto, el proceso de selección de tareas se realiza siguiendo los siguientes criterios:

- 1. Tarea para fallas ocultas:** La tarea proactiva vale la pena si reduce significativamente el riesgo de falla múltiple asociado a la función afectada a un nivel admisible. De lo contrario, la decisión “A falta de” debe ser la búsqueda de la falla y/o el rediseño del elemento o equipo.
- 2. Tarea para falla con consecuencias ambientales y para la seguridad:** La tarea proactiva vale la pena si por sí sola reduce el riesgo de la falla a un nivel tolerable o lo elimina. De lo contrario, la decisión “A falta de” debe ser la búsqueda de la falla y/o el rediseño del componente o el proceso en sí.

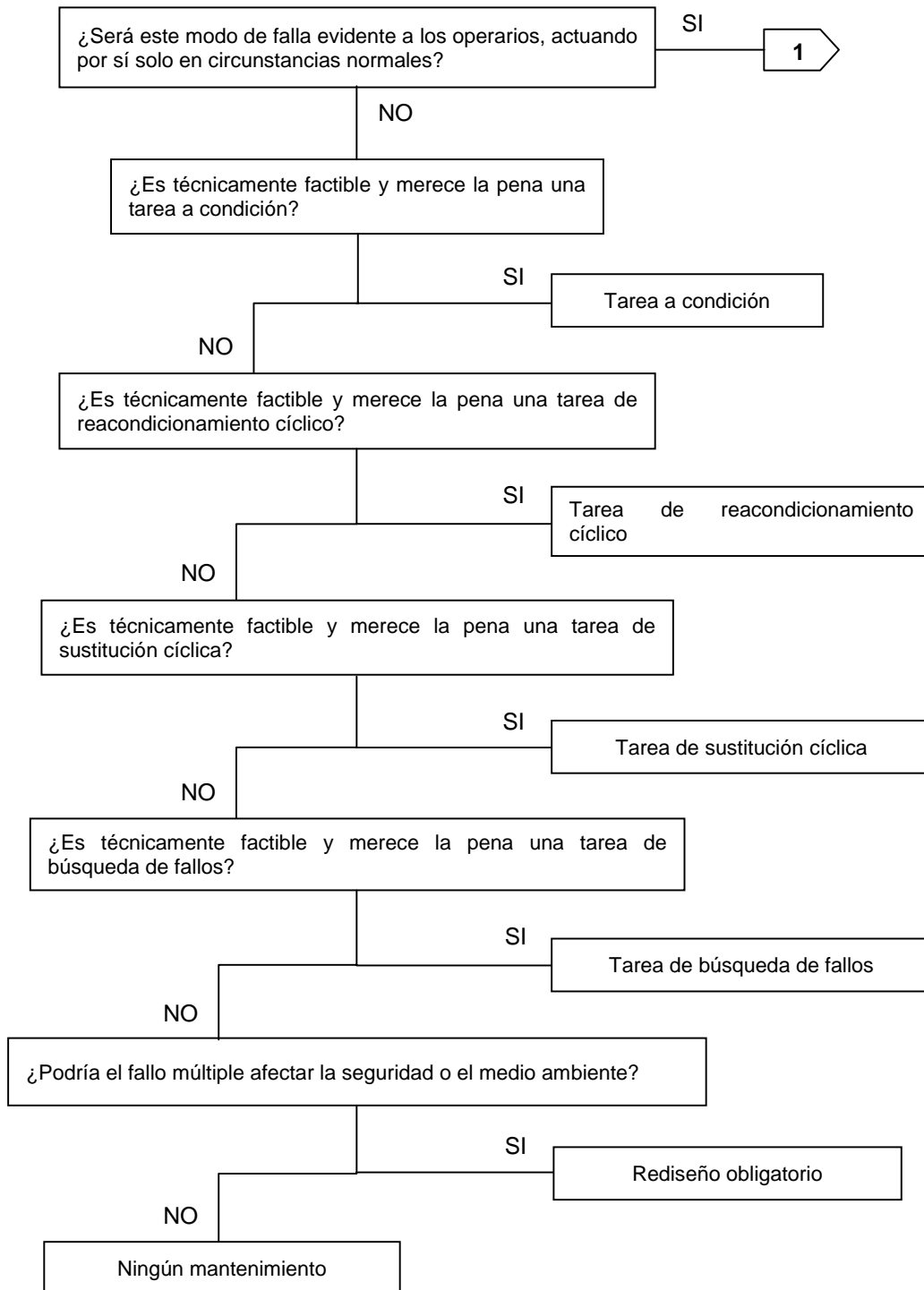
- 3. Tarea para falla con consecuencias operacionales:** La tarea proactiva solo vale la pena si su costo total, es menor al costo de asumir las consecuencias operacionales de la falla, incluyendo los costos para su posterior reparación. Es decir, la tarea debe tener justificación en el plano económico. De lo contrario, la decisión “A falta de” debe ser operar hasta la falla y el rediseño.
- 4. Tarea para falla con consecuencias no operacionales:** La tarea proactiva solo vale la pena si su costo total, es menor al costo de asumir las consecuencias no operacionales de la falla, incluyendo los costos para su posterior reparación. Es decir, la tarea debe tener justificación en el plano económico. De lo contrario, la decisión “A falta de” debe ser operar hasta la falla y el rediseño.

En siguiente diagrama de flujo, se muestra el llamado árbol de decisión para RCM, en el cual se resumen los criterios de decisión y las diferentes rutas que deben seguirse de acuerdo a las consecuencias de las fallas.

Es de suponerse, que para poder hacer uso del árbol de decisión, primero debemos medir las consecuencias de las fallas. Más adelante se mostrará cómo se lleva a cabo esta valoración.

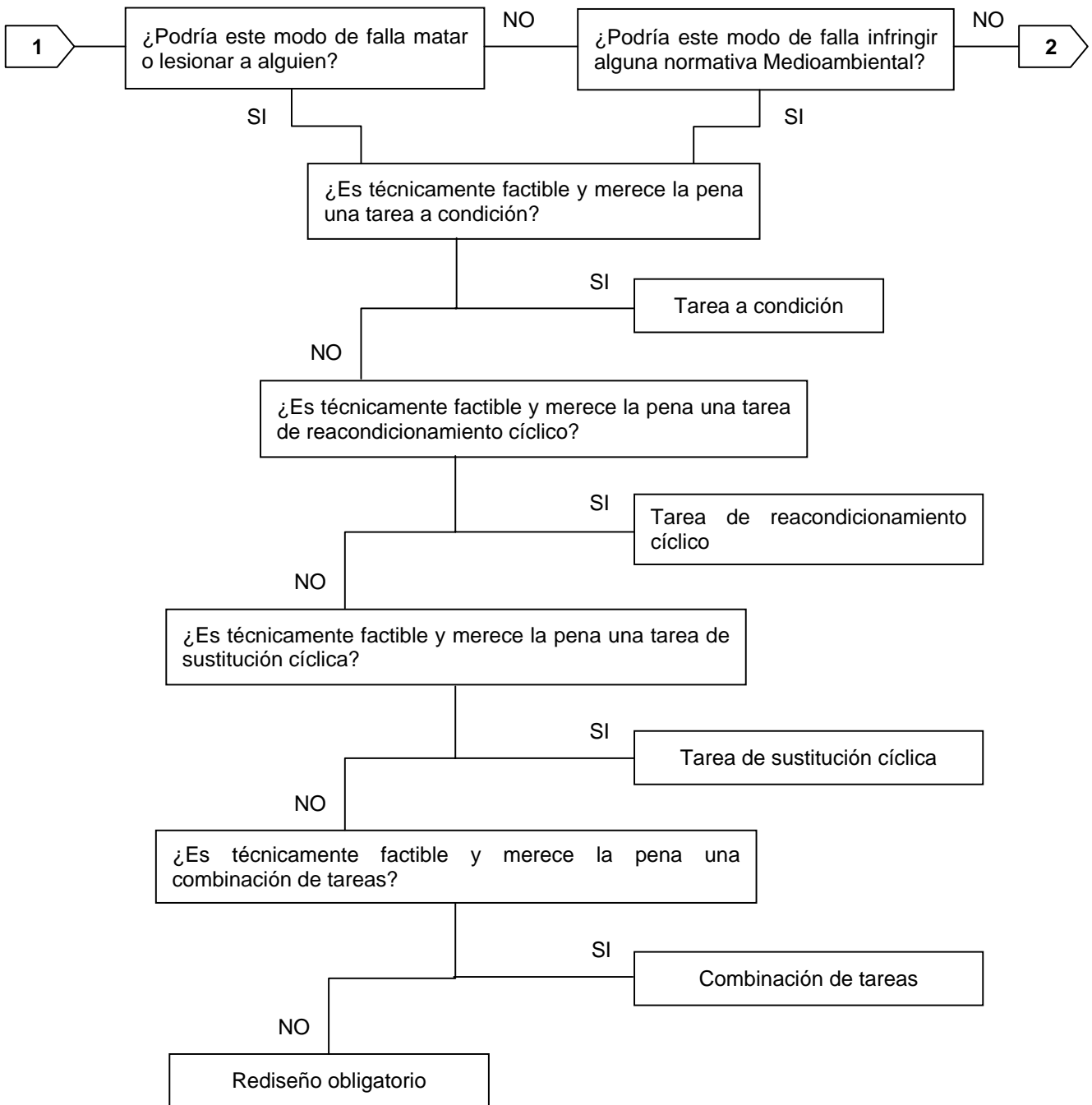
CONSECUENCIAS DEL FALLO OCULTO

Figura 7. Diagrama de decisión fallo oculto
Fuente: Los autores



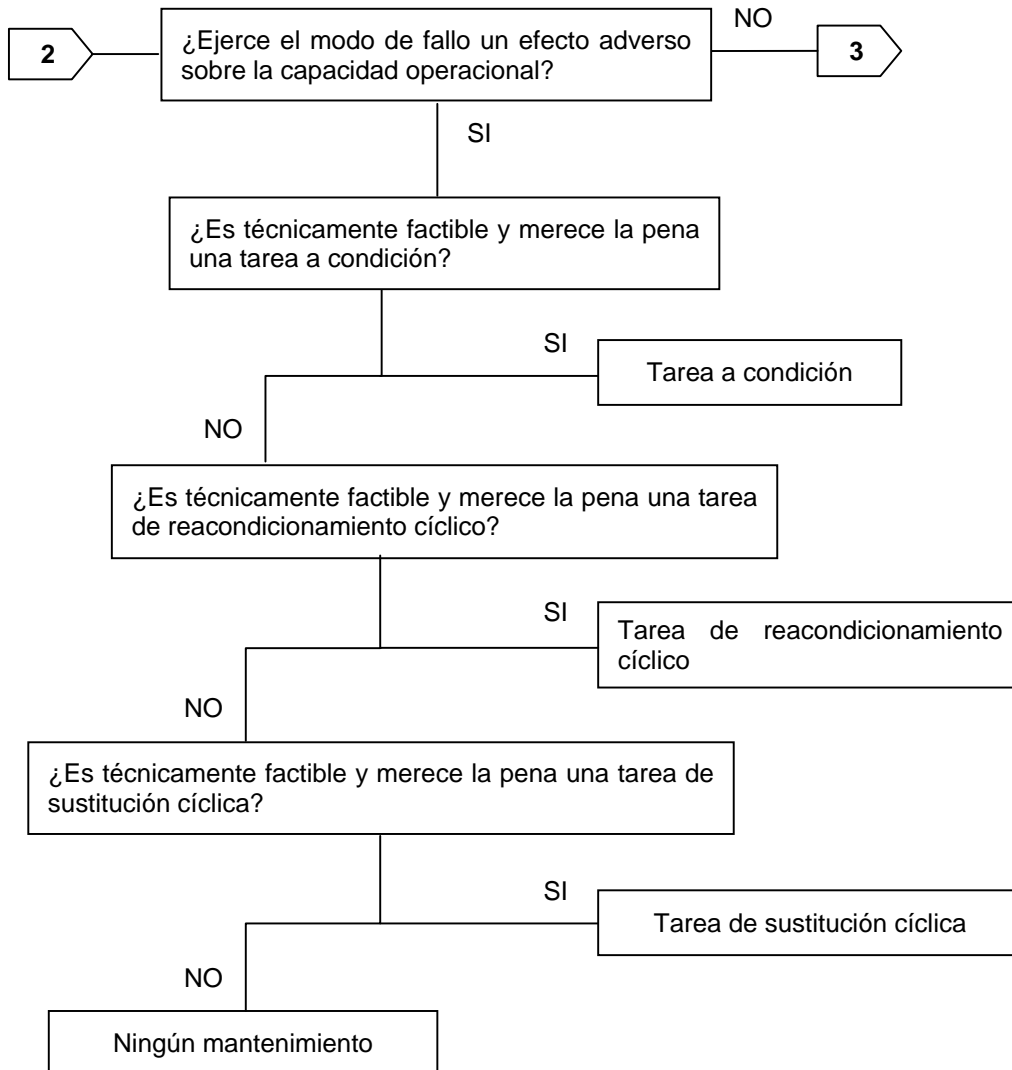
CONSECUENCIAS PARA LA SEGURIDAD Y EL MEDIO AMBIENTE

Figura 8. Diagrama de decisión seguridad y medio ambiente
Fuente: Los autores



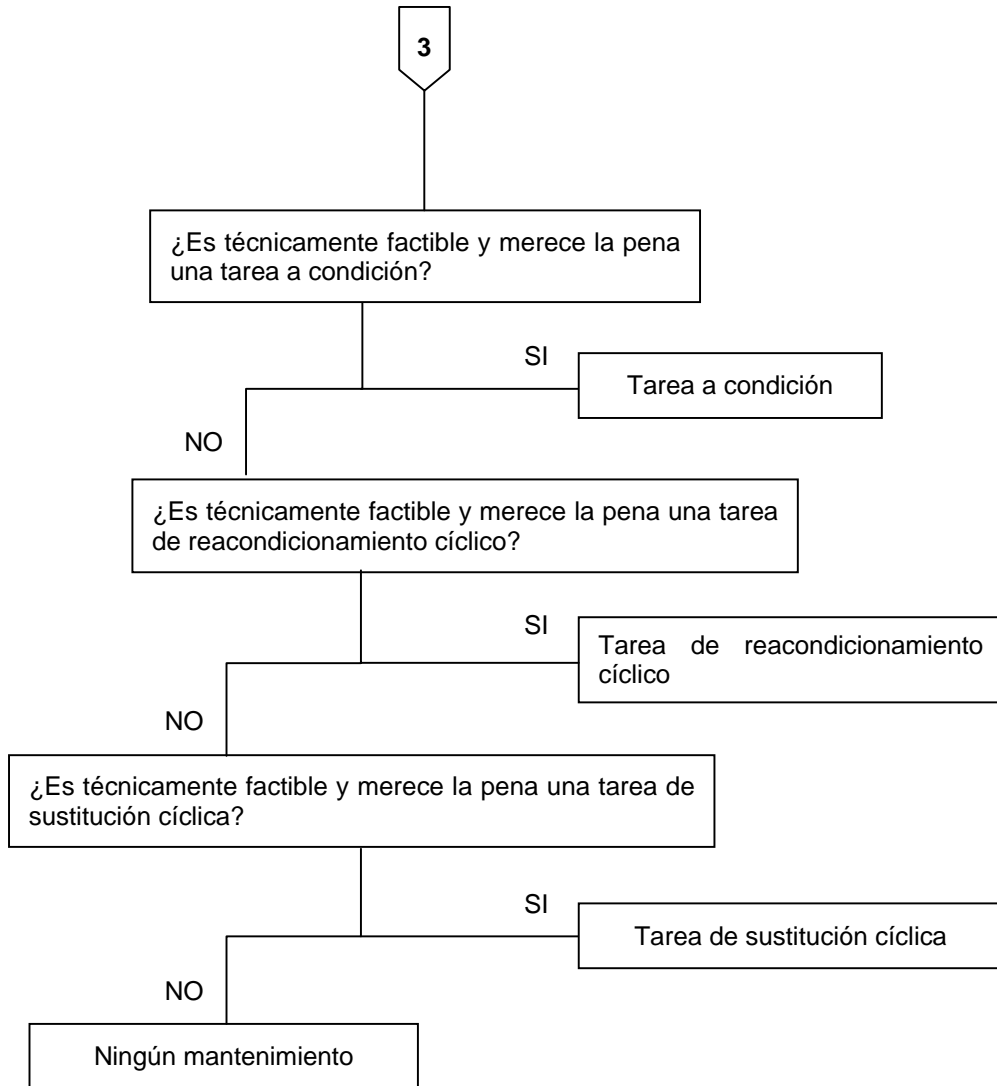
CONSECUENCIAS OPERACIONALES

Figura 9. Diagrama de decisión consecuencias operacionales
Fuente: Los autores



CONSECUENCIAS NO OPERACIONALES

Figura 10. Diagrama de decisión consecuencias no operacionales
Fuente: Los autores



3.2 ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD ¹⁷

La confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad (*CMD*), son prácticamente las únicas medidas fundamentadas en cálculos estadísticos con las que cuenta el mantenimiento para su análisis y evaluación. La confiabilidad se mide a partir del número y duración de las fallas, la mantenibilidad se cuantifica a partir de la cantidad y de la duración de las reparaciones; mientras que la disponibilidad se mide a partir de la confiabilidad y de la mantenibilidad. A través del *CMD* se puede planear, ejecutar y controlar totalmente la gestión y operación del mantenimiento.

- 1. Confiabilidad:** Se define como la probabilidad de que un equipo desempeñe satisfactoriamente las funciones para cuales fue diseñado, durante un periodo de tiempo especificado y bajo las condiciones adecuadas. Se utiliza para el análisis de datos operativos para el mantenimiento, permitiendo conocer el comportamiento de los equipos en operación con el fin de aislar componentes con problemas, diseñar las políticas de mantenimiento, calcular instantes óptimos de sustitución económica de equipos y establecer frecuencias de ejecución del mantenimiento.
- 2. Mantenibilidad:** Se define como la probabilidad de que un elemento, maquina o dispositivo, pueda regresar a su estado de funcionamiento (*SoFu*), después de una falla o interrupción productiva, a través de su reparación o realización

¹⁷ MORA GUTIERRES Alberto, Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios, editorial AMG, Envigado Antioquia, 2009.

de tareas de mantenimiento, con el fin de eliminar las causas inmediatas que generan la interrupción. La mantenibilidad se asocia, generalmente, a la facilidad con la que un elemento o dispositivo puede ser restaurado a sus condiciones de funcionalidad establecidas. Es una media vital para la predicción, evaluación, control y ejecución de las tareas correctivas o proactivas de mantenimiento; permite mejorar los tiempos y las frecuencias de ejecución de acciones de reparación o mantenimiento en las maquinas.

- 3. Disponibilidad:** Se define como la probabilidad de que un equipo funcione satisfactoriamente, en el momento en el que sea requerido después del comienzo de su operación, cuando se usa bajo condiciones estables. Es una herramienta útil en situaciones en las que se tiene que tomar decisiones con respecto a la adquisición de un elemento entre varias posibles alternativas.

Existen distintas clases de disponibilidad, dependiendo de los factores que se tomen en cuenta para calcular la base de tiempo, por ejemplo, *la disponibilidad genérica, disponibilidad inherente, disponibilidad alcanzada, disponibilidad operacional y la disponibilidad operacional generalizada*, se pueden obtener, con base en: el tiempo de operación, el tiempo activo de reparación, tiempo inactivo, tiempo en mantenimiento preventivo, tiempo administrativo, tiempo de funcionamiento sin producir y tiempo logístico.

En el presente trabajo, se usará la disponibilidad inherente, ya que es la más adecuada para empresas donde se quiere empezar a medir los indicadores CMD.

- 4. Falla:** Se define como un evento que provoca la pérdida total o parcial de la capacidad de un equipo para realizar las funciones para las cuales es diseñado. Un equipo, una maquina o un dispositivo, se puede encontrar en uno de los dos posibles estados: estado de funcionamiento (*SoFu*¹⁸) o estado en falla (*SoFa*¹⁹). Los estados del equipo se denominan *perfil de funcionalidad*.

3.2.1 Estimación de la No Confiabilidad $F(t)$ y de la Mantenibilidad $M(t)$

Para la estimación de los parámetros de No Confiabilidad y Mantenibilidad, se utiliza el método propuesto por el autor: *Mora, 2009, 57-58*, en su “Modelo Universal e Integral, propuesto para la medición de CMD”. Para propósitos del presente trabajo, se explicará de forma muy resumida, la metodología propuesta por dicho autor.

- 1. Obtención de los datos:** A través de las hojas de vida de los equipos y de la información contenida en el sistema de información de la empresa, se obtienen los tiempos útiles, fallas, reparaciones, tiempos perdidos de

¹⁸ *State of function*

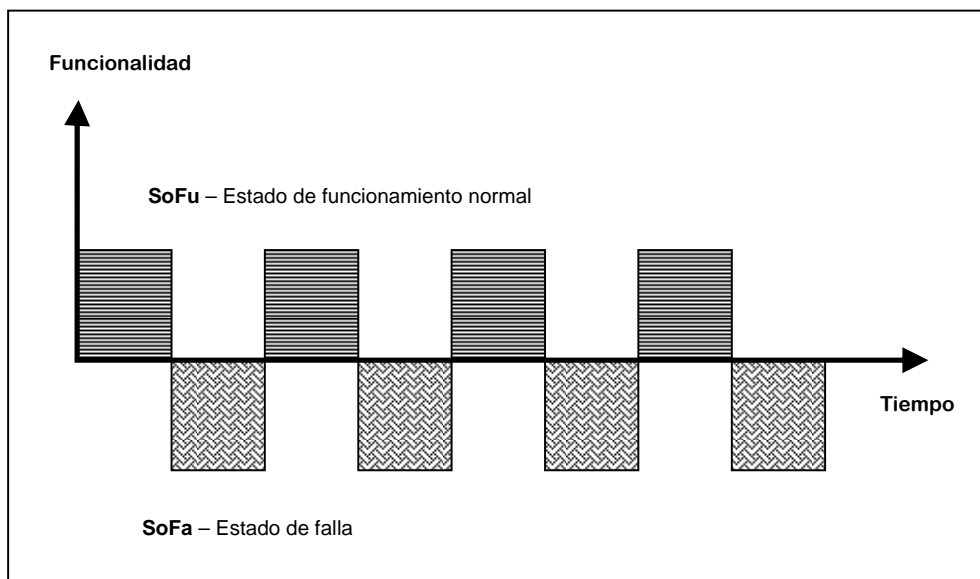
¹⁹ *State of Failure*

producción y mantenimiento, tiempos de suministros y demás tiempos requeridos.

- 2. Preparación de los datos:** Se realiza un esquema de *perfil de funcionalidad* y se separa lo correctivo de lo planeado.

El perfil de funcionalidad se construye graficando en una línea de tiempo, los estados de funcionalidad del equipo (*SoFu* y *SoFa*).

Figura 11. Diagrama de *Perfil de Funcionalidad*.
Fuente: Los autores



Se debe tener en cuenta que el estado de funcionamiento *SoFa*, corresponde al llamado *DT (Down Time)* o Tiempo No Operativo, y este a su vez incluye: el *ADT (Administrative Delay Time)* o Tiempo de Retraso Administrativo, que

consiste en los retrasos exógenos a la actividad propia de reparación, por ejemplo: suministro de personal especializado, entrenamiento, revisión de manuales, localización de herramientas, cumplimiento de procesos, etc.; el *LDT'* (*Logistic Delay Time*) o Tiempo de Retraso Logístico, que consiste en los tiempos empleados para la obtención de insumos y suministros para la reparación, por ejemplo: transporte de repuestos o construcción de un repuesto especial; y el *TTR* (*Time To Repair*) o Tiempo de Reparación, que consiste en el tiempo empleado en la reparación neta.

De igual manera, el estado de funcionamiento SoFu, corresponde al llamado *UT* (*Up Time*) o Tiempo Útil en el que el equipo funciona correctamente.

- 3. Se calcula la disponibilidad deseada o factible:** Con los datos recolectados, se escoge cuál tipo de disponibilidad se va a calcular, se toma en cuenta la calidad y cantidad de los datos recolectados. Se calcula de manera puntual la disponibilidad inherente de la siguiente forma:

Ecuación 1. Disponibilidad Inherente

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

Donde:

$MTBF^{20}$: Es el promedio de los tiempos individuales de operación sin fallas (UT).

$MTTR^{21}$: Es el promedio de los tiempos individuales de reparación TTR (DT).

4. Estimación de parámetros de No Confiabilidad y Mantenibilidad: Con los datos recolectados y graficados en el perfil de funcionalidad. Se construye una tabla para la *No Confiabilidad* con las siguientes columnas: numero de dato “ j ”, datos de operación sin fallas en horas, TBF, ordenados de menor a mayor y sin datos repetidos “ t_j ”; porcentaje acumulado para cada tiempo de falla “ $F(t_j)$ ” a través del *método i-kaésimo*, (N , es el número total de datos).

Ecuación 2. Porcentaje acumulado de falla, método *i-kaésimo*

$$F(t) = j / (N + 1)$$

Para la *Mantenibilidad*, se construye una tabla con las siguientes columnas: numero de dato “ j ”, datos de reparaciones en horas²² TTR ordenados de

²⁰ *Media Time Between Failure.*

²¹ *Media Time To Repair.*

menor a mayor y sin datos repetidos “ t_j ”; porcentaje acumulado para cada tiempo de falla “ $M(t_j)$ ” a través del *método i-kaésimo*.

Ecuación 3. Porcentaje acumulado de mantenibilidad, método *i-kaésimo*

$$M(t) = j / (N + 1)$$

5. Alineación de los datos para Weibull: Para obtener la alineación de la función de distribución deseada, para este caso la función de distribución de Weibull²³, se requieren una serie de transformaciones para que los datos sean ajustados a la forma de la ecuación de una recta; dichas transformaciones son las siguientes:

- Para el caso de la No confiabilidad:

Ecuación 4. Alineación de Weibull para la No confiabilidad, eje Y

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

²² Estos tiempos de vida pueden medirse en horas, millas, ciclos de fracaso, ciclos de tensión o cualquier otra medida con la que la vida o exposición del ítem pueda evaluarse.

²³ MORA GUTIERRES Alberto, Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios, editorial AMG, Envigado Antioquia, 2009. pág. 85.

Ecuación 5. Alineación de Weibull para la No confiabilidad, eje X

$$X_j = \ln(t_j)$$

- Para el caso de la Mantenibilidad:

Ecuación 6. Alineación de Weibull para la Mantenibilidad, eje Y

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

Ecuación 7. Alineación de Weibull para la Mantenibilidad, eje X

$$X_j = \ln(t_j)$$

Luego, se le agregan a las tablas anteriormente construidas, las columnas correspondientes a los datos X_j y Y_j , para el caso de la No Confiabilidad y Mantenibilidad.

Con los datos X_j y Y_j , se realiza una regresión lineal con mínimos cuadrados, con ello se estima la pendiente y el intercepto de la recta que más se ajusta a los datos obtenidos.

Para evaluar qué tan bien se ajustan los datos a la recta obtenida, se utilizan los siguientes criterios: el ajuste, el error estándar del estimado S_e , el coeficiente muestral de determinación r^2 y el coeficiente de correlación r .

- a. Ajuste:** Manifiesta qué tan centrada está la alineación con respecto al eje Y . Debe ser igual o tender a cero.

Ecuación 8. Ajuste de la alineación

$$Ajuste = \sum |Y_j - \hat{Y}_j|$$

- b. Error estándar del estimado (S_e):** Evalúa la variabilidad o dispersión de los puntos Y_j alrededor de la recta alineada. Debe tender a cero o al mínimo valor posible.

Ecuación 9. Error estándar del estimado

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N - 2}}$$

- c. Coeficiente de determinación muestral (r^2):** Evalúa el grado de asociación que existe entre los puntos correspondientes a las dos variables Y y X . Debe acercarse a 1, sus valores aceptables son: $0.9025 \leq r^2 \leq 1.0000$

Ecuación 10. Coeficiente de determinación muestral

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y}_j)^2}$$

- d. Coeficiente de correlación (r):** Indica la correlación existente entre los datos y el estimador de No Confiabilidad o de Mantenibilidad. Su valor debe oscilar entre: $0.95 \leq r \leq 1.00$, el signo advierte sobre el sentido de la correlación, directo o inverso entre las variables Y y X .

Ecuación 11. Coeficiente de correlación

$$r = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X}) * (Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2 * \sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}}$$

Donde:

- \hat{Y}_j , son los valores estimados a través de la ecuación de la recta $Y = a + b * X$ correspondiente para cada X_j .
- \bar{Y} y \bar{X} , son los valores promedios de los valores originales X y Y .

Se recomienda completar las tablas antes mencionadas, con la información obtenida de las ecuaciones 8 a la 11.

6. Parametrización de Weibull: Ahora, se calculan los parámetros de escala Eta (η) y de forma (β). A través de las siguientes ecuaciones:

Ecuación 12. Parámetro de escala de Weibull

$$\eta = e^{\left[-\frac{\text{Intersección}}{\text{Pendiente}} \right]}$$

Ecuación 13. Parámetro de forma de Weibull

$$\beta = \text{Pendiente de la recta alineada}$$

Resumidamente, los parámetros de escala Eta (η) y de forma Beta (β), son propios de la función de distribución de Weibull. El parámetro Eta, indica sobre la vida útil del producto o del sistema. Mientras que el parámetro Beta, refleja la dispersión de los datos y determina la forma que toma la distribución (Curva de Davies²⁴). Cada uno de estos parámetros, se calcula por separado tanto para la Mantenibilidad como para la Confiabilidad.

7. Chequeo de bondad de ajuste: Son pruebas para determinar si el ajuste de los datos, bajo los parámetros estimados, corresponden a la distribución seleccionada. Para el caso específico del presente trabajo, donde hemos usado el “Modelo Universal e Integral propuesto para la medición CMD”, (Mora, 2009); las pruebas de bondad realizadas son: Ji^2 , Kolmogórov – Smirnov y la de Anderson – Darling. Al menos dos de las tres pruebas deben ser superadas para validar el ajuste de los datos.

²⁴ MORA GUTIERRES Alberto, Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios, editorial AMG, Envigado Antioquia, 2009. pág. 78 y 268.

8. Calculo de MTBF y MTTR, estrategias, tácticas y acciones de mantenimiento: Por último, se calculan los dos parámetros claves que se obtienen de la Confiabilidad y de la Mantenibilidad (*MTBF* y *MTTR*); anteriormente calculados de manera puntual, ahora se calculan a través de la distribución de Weibull, de la siguiente forma:

Ecuación 14. Calculo del tiempo medio entre fallas

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

Ecuación 15. Calculo del tiempo medio para reparar

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

Los parámetros η y β , son los correspondientes a la Confiabilidad para *MTBF* y a la Mantenibilidad para *MTTR*.

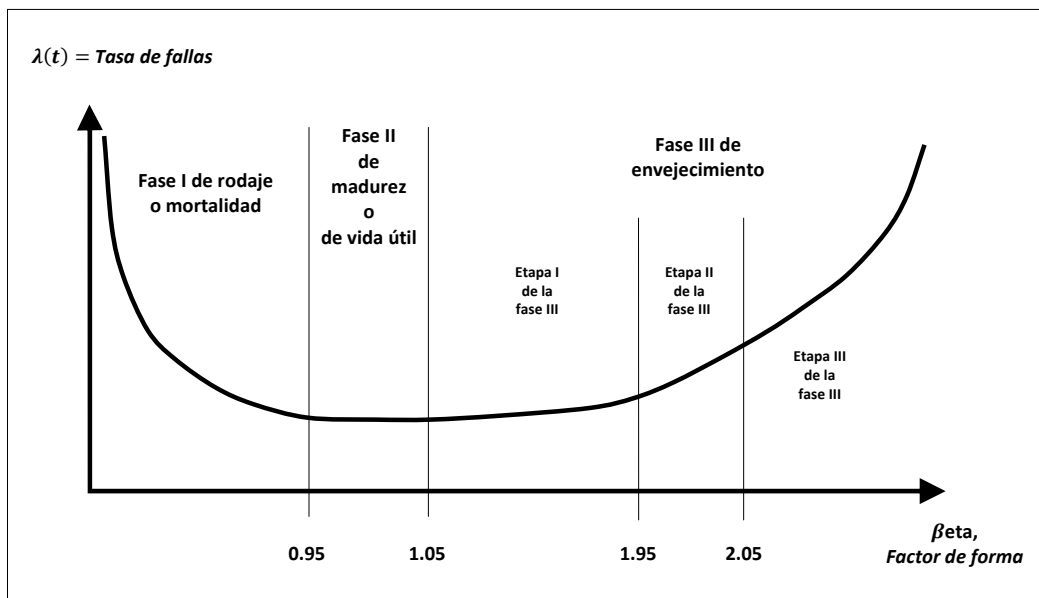
La estrategia a implementar, depende del comportamiento de la tasa de fallas $\lambda(t)$, que a su vez expresa, la cantidad de averías o reparaciones por unidad de tiempo. El factor de forma β , se relaciona con la tasa de fallas a través de la Curva de Davies (también llamada Curva de la Bañera); convirtiéndose así el valor de β , en un indicador de Confiabilidad.

- **Curva de Davies**²⁵: Muestra la evolución de la tasa de fallas $\lambda(t)$, con respecto al valor del factor de forma β . Las diferentes fases de la Curva de Davies se describen a continuación:
 - a. **Fase I:** Se caracteriza por una tasa de fallas decreciente a medida que pasa el tiempo, la probabilidad de que ocurra una falla disminuye; las acciones que se sugieren en esta fase son las de tipo correctivo ($0.0 < \beta < 0.95$).
 - b. **Fase II:** En esta etapa, la tasa de fallas es constante y estas son de origen técnico; ya sea de procedimiento humanos o equipos, las acciones que son más favorables para esta etapa son las de tipo correctivo, cuando las fallas son esporádicas. Adicionalmente, se recomienda el uso del análisis de causa raíz y acciones modificativas ($0.95 \leq \beta < 1.05$). Se puede empezar la implementación de la táctica *TPM* y *RCM*.
 - c. **Fase III:** Se subdivide en tres etapas. En la etapa I $1.05 \leq \beta < 1.95$, se observa un incremento suave en la tasa de fallas, las fallas que aparecen son conocidas y se adquiere experiencia a través de estas; se comienza a aplicar el mantenimiento preventivo ya que se conocen bien las fallas. En la etapa II $1.95 \leq \beta < 2.05$, se denota por el incremento en la tasa de fallas de forma constante, se inicia la transición entre las acciones preventivas

²⁵ MORA GUTIERRES Alberto, Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios, editorial AMG, Envigado Antioquia, 2009. pág. 77.

hacia las acciones predictivas; en esta etapa se consolida totalmente el mantenimiento preventivo. Por último, en la etapa III $2.05 \leq \beta$, se manifiesta el envejecimiento puro y se consolida el mantenimiento predictivo, ya que las fallas se hacen totalmente predecibles y sus tiempos de duración se normalizan totalmente, se consolida el uso del RCM y se utiliza la sustitución cíclica como último recurso.

Figura 12. Curva de la Bañera o Curva de Davies.
Fuente: Los autores



3.3 ANÁLISIS DE CRITICIDAD

Es una metodología que permite jerarquizar los sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global; con el fin de optimizar el proceso de asignación de los recursos económicos, técnicos y humanos. Es un modelo semicuantitativo, basado en el concepto de riesgo, el cual equivale a la frecuencia de fallas por las consecuencias de las fallas.

El análisis se realiza vía tormenta de ideas en una reunión de trabajo con un grupo multidisciplinario entre los que se encuentran la línea supervisora y trabajadores de operaciones y mantenimiento, ingeniería de procesos o infraestructura, analista de mantenimiento (preventivo/predictivo), con la finalidad de unificar criterios y validar la información.

Algunos de los conceptos claves utilizados para realizar el análisis son los siguientes:

- Flexibilidad operacional o disponibilidad de una función alterna o de respaldo.
- Efectos en la continuidad operacional o capacidad de producción.
- Efectos en la calidad del producto.
- Efectos en la seguridad, ambiente e higiene.
- Costos de paradas y del mantenimiento.
- Frecuencia de fallas y confiabilidad.

- Disponibilidad de repuestos.

La expresión utilizada para jerarquizar ya sean los sistemas, instalaciones y equipos, es la siguiente:

Ecuación 16. Calculo de la criticidad del equipo o sistema

$$C = FF * CF$$

Donde:

C: Criticidad

FF: Frecuencia de Fallas (Numero de fallas en un tiempo determinado $\frac{\text{Fallas}}{\text{año}}$)

CF: Consecuencia de Fallas

Ecuación 17. Calculo de las consecuencias de las fallas

$$CF = (IP * FLX) + CM + ISA$$

Donde:

IP: Impacto en producción

FLX: Flexibilidad

CM: Costos de mantenimiento

ISA: Impacto en Seguridad y Ambiente

La siguiente tabla, se muestran los valores utilizados para calcular la criticidad para nuestro caso en particular.

Tabla 2. Criterios ponderados para el análisis de criticidad
Fuente: Autores

FRECUENCIA DE FALLAS		
RANGO	PROBABILIDAD	COMENTARIO
4	Alta	Mayor a 2 fallas por año
3	Moderada	Entre 1 y 2 fallas por año
2	Ocasional	Entre 0,5 y 1 fallas por año
1	Baja	Menos de 0,5 fallas por año
IMPACTO EN LA PRODUCCION		
RANGO	EFECTO	COMENTARIO
10	Muy alto	Pérdida total del servicio. La falla ocurre sin advertencia previa. Gran demora en la reparación.
8	Alto	Pérdida de función del sistema local, gran demora en la reparación, afecta otras partes del sistema. La falla puede ser detectada.
6	Moderado	Pérdida de función del sistema local, demoras significativas para restaurar su funcionamiento, no afecta otras partes del sistema.
4	Bajo	Perturbación menor del funcionamiento. Posible acción correctiva durante el servicio.
1	Muy bajo	La falla no tendrá efectos en la función del sistema.

FLEXIBILIDAD OPERACIONAL		
RANGO	EFECTO	COMENTARIO
4	Alto	No existe opción de producción y no hay función de repuesto.
2	Moderado	Hay opción de repuesto compartido.
1	Leve	Opción de repuesto disponible.
COSTO DE MANTENIMIENTO		
RANGO	EFECTO	COMENTARIO
3	Alto	Mayor a \$ 200 millones
2	Moderado	Entre \$ 100 - \$ 200 millones
1	Bajo	Menor de \$ 100 millones
IMPACTO EN LA SEGURIDAD Y EL AMBIENTE		
RANGO	EFECTO	COMENTARIO
8	Muy alto	Afecta la seguridad humana, tanto interna como externa, y requiere de la notificación a entes externos de la organización.
7	Alto	Afecta el ambiente e instalaciones causando daños severos.
5	Moderado	Afecta las instalaciones.
3	Bajo	Provoca daños menores (ambiente y seguridad).
1	Muy bajo	No provoca ningún tipo de daño a personas, al ambiente e instalaciones.

4 IMPLEMENTACION DEL MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD

En el RCM, se atienden los subsistemas, equipos o procesos, utilizando los recursos disponibles en la compañía; estos recursos representan un costo para la empresa y deben ser utilizados de la manera más eficiente posible. Por tal razón, los autores proponen iniciar la aplicación de RCM con un *análisis preliminar de criticidad* en cada una de las estaciones de bombeo con el fin de identificar cual presenta mayor grado de criticidad, y de esta manera, concentrar los recursos de la organización donde más se necesitan.

4.1 ANÁLISIS PRELIMINAR DE CRITICIDAD DE LAS ESTACIONES DE BOMBEO

Evaluaremos cada estación con base en la Tabla 2, de ponderación de criterios, valorando cada factor de la Ecuación 1, utilizando para ello la Ecuación 2.

- **Frecuencia de fallas**

Debido a los planes de mantenimiento preventivos y predictivos que se tienen implementados en cada estación, resulta muy baja la frecuencia de fallas en los equipos de bombeo. Para el caso de los equipos rotativos, el programa de análisis de vibraciones y alineamientos que se realiza a los mismos, resulta ser una herramienta muy efectiva para la detección oportuna de cualquier desbalanceo, desalineamiento, desgaste de rodamiento, etc.; que conduzca a graves averías por rotura de maquinaria, que pueda poner en riesgo la pérdida de la función principal de estos equipos.

A pesar de los planes de mantenimiento adoptados, existen fallas ocasionadas por factores externos, que en ocasiones causan la pérdida de la función primaria y su recuperación genera costos equivalentes hasta de un 30% del costo inicial del equipo.

Adicionalmente, se debe tener en cuenta que la función primaria del equipo de bombeo requiere de otros elementos como: Arrancadores, sistema de control y protección, motores, rejillas en cámaras de succión, válvulas de aislamiento, válvulas anti-ariete, etc.; y que debido a esto, la falla en alguno de estos elementos ocasionaría la pérdida de la función primaria, Tabla 3.

En consecuencia de todo lo anterior, la valoración de la frecuencia de fallas para los equipos de bombeo de cada estación de bombeo es menor a una falla por año;

es decir, que de acuerdo a la Tabla 2, la frecuencia de fallas tiene un *valor de 2 (ocasional)* en todas las estaciones.

Tabla 3. Condiciones asociadas a la falla en el sistema de bombeo
Fuente: Autores

FALLAS OCASIONADAS EN LAS BOMBAS CON PERDIDA DE FUNCION PRIMARIA	
Alta sedimentación en agua bombeada	Desgaste Prematuro Impulsores
	Desgaste Prematuro Anillos de desgaste
	Desgaste Prematuro Cojinetes
	Desgaste Prematuro Ejes
Sólidos contenidos en agua de bombeo cámara de succión	Rotura de Impulsores
	Rotura de Ejes
	Desbalanceo con vibraciones fuera de valores de alarma con consecuencias graves
Elementos asociados a la operación de la bomba.	Avería en motor de accionamiento
	Avería Válvulas de aislamiento
	Avería en válvula anti-ariete
	Avería en tubería de Impulsión
	Avería en rejilla de cámara de succión
	Avería en arrancador de motor de accionamiento

- **Impacto operacional**

Durante eventos de ocurrencia de desbalanceo, desalineamiento, desgaste de rodamiento, etc., en máquinas rotativas en donde la magnitud del parámetro medido se aproxima a los valores de alarma plenamente establecidos, los cuales son detectados oportunamente, se realiza la programación de la parada del equipo, (con una duración de parada que oscila entre 20 y 25 días), para una fecha y hora en donde se cuente con la disponibilidad de los recursos necesarios (técnicos, herramientas, repuestos, seguridad, maquinarias, equipos, etc.) para llevar el equipo a la condición inicial en donde realiza su función primaria para el cual fue adquirido. El tiempo de demora de la parada del equipo, se debe principalmente a las grandes dimensiones del equipo y a la reconstrucción geométrica de este para su puesta en funcionamiento. Por lo tanto, la valoración del impacto en la producción, que acontece a raíz del mal funcionamiento del equipo de bombeo, es de 6 (moderado), para cada una de las estaciones de bombeo.

- **Flexibilidad operacional**

Normalmente, los sistemas de bombeo de las diferentes estaciones, cuentan con por lo menos (1) unidad de bombeo de reserva, con el objetivo de suplir la falta de alguno de los equipos debido a acciones de mantenimiento. Para cubrir la demanda de la ciudad de Cartagena; la cual oscila entre 196.000 y 210.000 m³/día

durante las épocas de temporada turística alta, (en donde se debe cubrir la demanda normal más la demanda flotante), funcionan permanentemente algunas de las unidades disponibles (véase Tabla 1). Manteniendo el equipo restante listo para entrar a reemplazar las funciones de aquella que salga del servicio.

Se puede presentar el evento, donde alguna de las unidades de bombeo requiera estar fuera de servicio para realizarle acciones de mantenimiento, ya sea programado o no programado; sin embargo, cuando se encuentra un equipo de bombeo en mantenimiento, el sistema no está preparado para asumir la demanda de la ciudad, si por cualquier motivo se hace necesario intervenir un segundo equipo que requiera de mantenimiento.

De esta manera, existe en el sistema una flexibilidad operacional de *valor 1 (leve)* de acuerdo con los requerimientos de producción existentes actualmente.

- **Costo del mantenimiento**

El costo de mantenimiento programado anual de las estaciones de bombeo de agua cruda, depende de las actividades que genera la programación de mantenimiento establecida para cada estación. Las actividades de mantenimiento que se realizan durante un año, se han establecido con base en la experiencia adquirida durante años de operación y mantenimiento de los equipos por parte de los técnicos y de acuerdo a recomendaciones de los fabricantes de equipos.

A raíz de esto, el criterio utilizado para definir las frecuencias de las actividades de mantenimiento en los equipos no está enmarcada en ninguna de las tácticas de mantenimiento reconocidas internacionalmente como: RCM, TPM, etc.

Por tal motivo, podemos suponer que al utilizar RCM como herramienta para establecer las frecuencias de mantenimiento en los equipos, de manera que queden enmarcadas por esta táctica, podemos omitir aquellas actividades de mantenimiento innecesarias que conduzcan a sobrecostos en este proceso.

En la Tabla 4, se presentan las actividades de mantenimiento más relevantes con sus respectivas frecuencias, establecidas de manera cuasi-empírica. Estas actividades se realizan en cualquiera de las estaciones de bombeo de agua cruda.

Tabla 4. Actividades de mantenimiento más relevantes
Fuente: Autores

EQUIPO	ACTIVIDAD	FRECUENCIA
Motores	Verificación de Temperatura Rodamientos y Bobinado de Estator	En Continuo
	Verificación Parámetros de Operación	En Continuo
	Análisis de vibración, Alineamiento, Ajuste tornillería	Cada (3) meses
	Verificación Protecciones	Cada (1) año

	Mantenimiento General (Despiece, limpieza General)	Cada (1) año
Bombas	Verificación Parámetros de Operación	En Continuo
	Análisis de vibración, Alineamiento, Ajuste tornillería	Cada (3) meses
	Mantenimiento General (Despiece, recambio elementos, limpieza mecánica, recubrimientos)	Cada (34) meses
	Inspección y limpieza cámara de succión	Cada (6) meses
Arrancadores	Mantenimiento General (limpieza General, engrase, reposición contactos)	Cada (6) mese
Transformadores de Potencia	Mantenimiento General (Inspección general, ajuste tornillería, limpieza)	Cada (6) meses
	Verificación de Temperatura Bobinados y Aceite	En Continuo
	Verificación Parámetros de Operación	En Continuo
	Análisis Físicoquímicos y Cromatografía de Gases	Cada (1) año
	Prueba de campo	Cada (1) año
Cargadores/rectificadores	Mantenimiento General (Inspección general, ajuste tornillería, limpieza)	Cada (6) meses
Cámara de succión	Inspección y limpieza	Cada (6) meses
	Reposición rejilla de desbaste	Cada (36) meses
Edificio	Arreglos locativos	Cada (12) meses
	Pintura muros y tuberías	Cada (12) meses

Actualmente, bajo el criterio establecido por la empresa para las frecuencias de los mantenimientos programados en los equipos de bombeo, los costos anuales por estaciones de agua cruda son como indica la Tabla 5.

Tabla 5. Costos anuales de mantenimiento programado por estación, cifras en pesos m/c.
Fuente: Autores

Estación	Costo anual de mantenimiento
Albornoz	\$ 198,000,000
Dolores	\$ 266,000,000
Piedrecitas	\$ 177,000,000
Gambote	\$ 196,000,000
Conejos	\$ 606,000,000

La diferencia en los costos de mantenimientos por estación obedece a la diferencia existente entre las capacidades de las unidades de bombeo, ya que las dimensiones físicas definen las cantidades de materiales, mano de obra, maquinaria y herramientas utilizadas en cada unidad.

En promedio, para el caso de las estaciones de bombeo Dolores, Piedrecitas y Albornoz, las cuales cuentan con (6, 6 y 5) unidades de bombeo cada una; el 55% del total del presupuesto anual para mantenimiento (por estación), se gasta en la reparación general de unidades de bombeo. Ya que la programación del mantenimiento de estas estaciones, genera por lo menos el mantenimiento

correctivo de (1) unidad de bombeo en cada estación. El 45% restante del presupuesto anual para mantenimiento, (por estación), se gasta en mantenimiento predictivo.

Para el caso de la estación de bombeo Gambote, que cuenta solo con (2) unidades de bombeo, el costo de reparación general de unidades de bombeo representa el 28% del presupuesto anual de mantenimiento de la estación. Ya que la programación del mantenimiento de esta estación, solo genera un mantenimiento correctivo anual, mientras que un 48% se gasta en dragado de dársena y el 25% restante se gasta en mantenimiento predictivo.

Para el caso de la estación de bombeo Conejos, la cual en épocas climatológicas normales (sin fenómeno del niño), solo funciona (3) meses al año y cuenta con (4) unidades de bombeo. El costo de reparación general representa solo el 15% del presupuesto total anual, mientras que el 80% se gasta en dragado de dársena y solo un 5% se utiliza en mantenimiento predictivo.

La Tabla 6, nos muestra una relación de los costos de mantenimiento correctivo por unidad de bombeo en cada una de las estaciones.

Tabla 6. Costos anuales de mantenimiento por unidad de bombeo, cifras en pesos m/c.

Fuente: Autores

Estación	Costo de mantenimiento correctivo por unidad de bombeo
Albornoz	\$ 54,450,000
Dolores	\$ 73,150,000
Piedrecitas	\$ 28,675,000
Gambote	\$ 54,880,000
Conejos	\$ 25,450,000

En resumen, la tabla 7, muestra los costos discriminados por tipos.

Tabla 7. Costos anuales de mantenimiento por tipo, cifras en pesos m/c

Fuente: Autores

Estación	costo total	costo reparación general	costo mtto correctivo	costo mtto preventivo	costo mtto predictivo	costo dragado dársena
Albornoz	198	108,9	54,45	54,45	89,1	0
Dolores	266	146,3	73,15	73,15	119,7	0
Piedrecitas	177	97,35	48,675	48,675	79,65	0
Gambote	196	54,88	54,88	0	49	94,08
Conejos	606	90,9	45,45	45,45	30,3	484,8

- **Impacto en la seguridad y el medio ambiente**

Las captaciones de agua cruda perteneciente al acueducto de Cartagena, se encuentran localizadas a una distancia bastante considerable de las áreas residenciales, por tal motivo, el impacto causado por posibles fuentes de ruido, escape de gases o residuos peligrosos que puedan afectar la seguridad y medio ambiente, se puede asumir como de *valor 1 (muy bajo)*, para todas las estaciones.

No obstante, así como la localización alejada de los sitios de captación a las áreas residenciales se traduce en un impacto muy bajo en la Seguridad y el Medio Ambiente. Estas grandes distancias obligan a consumir grandes cantidades de energía en el proceso de transporte de agua cruda hacia los centros de producción de agua potable, lo cual se convierte en un aspecto ambiental significativo.

Frente a este hecho, la empresa permanentemente implementa proyectos de inversión con el fin de mitigar el impacto relacionado con el alto consumo de energía en pro de la conservación del Medio Ambiente.

Entre los proyectos de inversión podemos mencionar algunos como: la reposición de equipos antiguos por equipos nuevos con mayor eficiencia, operación eficiente del sistema y la ampliación de la sección de las conducciones de agua cruda. Todos estos cambios, están orientados a reducir al máximo el consumo de energía requerido para la operación del sistema de bombeo.

En la Tabla 8, se observa que la estación que más consume energía eléctrica al mes es la estación de Dolores.

Tabla 8. Consumo de energía eléctrica por mes en cada estación
Fuente: Autores

Estación	Energía consumida por mes, valores en kWh
Albornoz	1,600,000
Dolores	2`200,000
Piedrecitas	1,400,000
Gambote	300,000
Conejos	120,000

Ahora, se resumen cada uno de los criterios ponderados en la siguiente tabla, con el objetivo de manipular la información más fácilmente y poder identificar cual es la estación de bombeo que representa un mayor valor de criticidad.

Tabla 9. Resumen criterios ponderados
Fuente: Autores

Criterios ponderados	Albornoz	Dolores	Piedrecitas	Gambote	Conejos
Frecuencia de fallas	2	2	2	2	2
Impacto en la producción	6	6	6	6	6

Flexibilidad operacional	1	1	1	1	1
Costo de mantenimiento	2	3	2	2	2
Impacto en la seguridad y el ambiente	1	1	1	1	1

4.2 ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD EN LA EBAC DOLORES

Para fines demostrativos, se analizará uno de los equipos de la Estación de Bombeo de Agua Cruda de Dolores, específicamente la bomba número 1; utilizando la metodología descrita en el numeral 3.2.1 del presente trabajo. Se han escogido las bombas para el estudio de confiabilidad, ya que estos, son los equipos cuya función principal es “la razón de existir” de la estación de bombeo.

1. Se comenzará el estudio con la tabulación de los datos correspondientes a los UT y DT de los equipos de bombeo.

Tabla 10. Listado de actividades de mantenimiento.
Fuente: Autores

MANTENIMIENTOS REALIZADOS A LA BOMBA # 1 DE LA EBAC DE DOLORES		
<p>La bomba 1, entra en funcionamiento el 21 de Abril de 2004; desde entonces funciona las 24 horas del día, todos los días del año. A menos que se le esté realizando alguna tarea de mantenimiento que requiera de su parada.</p>		
Mantenimiento	Fecha	Horas
Entra en funcionamiento la bomba	21/04/2004	
Análisis de Vibración y Alineamiento	07/06/2004	0,5
Análisis de Vibración y Alineamiento	06/09/2004	0,5
Análisis de Vibración y Alineamiento	06/12/2004	0,5
Análisis de Vibración y Alineamiento	11/03/2005	0,5
Pintura General	27/04/2005	5
Análisis de Vibración y Alineamiento	14/06/2005	0,5
Análisis de Vibración y Alineamiento	20/09/2005	0,5
Análisis de Vibración y Alineamiento	16/12/2005	0,5
Análisis de Vibración y Alineamiento	13/03/2006	1
Pintura General	18/04/2006	3.9
Análisis de Vibración y Alineamiento	13/06/2006	0,5

Limpieza cámara de succión	08/08/2006	0.9
Análisis de Vibración y Alineamiento	05/09/2006	0,5
Análisis de Vibración y Alineamiento	31/12/2006	0,5
Desmontaje de bomba para restitución cíclica	28/02/2007	768
Análisis de Vibración y Alineamiento	23/03/2007	0,5
Pintura General	16/04/2007	3.95
Análisis de Vibración y Alineamiento	13/06/2007	0,5
Limpieza cámara de succión	09/08/2007	1.8
Análisis de Vibración y Alineamiento	19/09/2007	0,5
Análisis de Vibración y Alineamiento	18/12/2007	0,5
Limpieza cámara de succión	26/02/2008	1.7
Análisis de Vibración y Alineamiento	10/03/2008	0,3
Pintura General	11/04/2008	3.95
Análisis de Vibración y Alineamiento	25/06/2008	1
Limpieza cámara de succión	19/08/2008	1.9
Análisis de Vibración y Alineamiento	03/09/2008	1
Análisis de Vibración y Alineamiento	05/12/2008	2

Limpieza cámara de succión	23/02/2009	2
Análisis de Vibración y Alineamiento	08/03/2009	2
Pintura General	23/04/2009	3.4
Análisis de Vibración y Alineamiento	05/06/2009	1
Limpieza cámara de succión	20/08/2009	2.1
Análisis de Vibración y Alineamiento	07/09/2009	0,5
Análisis de Vibración y Alineamiento	09/12/2009	1
Limpieza cámara de succión	12/02/2010	2,5
Análisis de Vibración y Alineamiento	12/03/2010	1
Desmontaje de bomba para restitución cíclica	23/04/2010	767
Análisis de Vibración y Alineamiento	25/06/2010	1,5
Limpieza cámara de succión	08/08/2010	2.15
Análisis de Vibración y Alineamiento	10/09/2010	0,5

2. Con esta información, se puede calcular cuánto tiempo permanece la bomba en funcionamiento, si se toman en cuenta aquellos mantenimientos que requieren detener el equipo.

Tabla 11. Lapsos de los estados *SoFu* y *SoFa*.
Fuente: Autores

Numero de dato	1	2	3	4	5	6	7	8	9
UT	8404		8544		2688		4896		1128
DT		5		3.9		0.9		768	

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	2736		4752		1056		3120		4512	
3.95		1.8		0.16		4		1.9		2

21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1416		2808		4224		1440		2568	
	0.17		2.1		2.5		767		2.15

Ahora puede elaborarse el diagrama de *perfil de funcionalidad*, (se omite este paso), para visualizar los tiempos *DT* y *UT*.

- 3.** Con los datos tabulados en la anterior Tabla, se calcula de manera puntual la Disponibilidad Inherente.

$$MTBF = 3619,467$$

$$MTTR = 53.521$$

Aplicando la Ecuación 1. Se obtiene:

$$A_I = 98.542 \%$$

- 4.** Construimos las tablas de datos para la Confiabilidad y la Mantenibilidad, ordenadas de menor a mayor.

Tabla 12. Alineación de datos de NO CONFIABILIDAD para Weibull.
Fuente: Autores

No. Dato j	Datos de operación sin fallas (en horas) " t_j ".	$F(t) = j / N + 1$	$Y = \text{Ln}(\text{Ln}(1/(1-F(t))))$	$X = \text{Ln}(t_j)$
1	1056	6,250%	-2,74049301	6,96224346
2	1128	12,500%	-2,01341868	7,02820143
3	1416	18,750%	-1,57195253	7,25559127
4	1440	25,000%	-1,24589932	7,27239839
5	2568	31,250%	-0,98164706	7,85088266
6	2688	37,500%	-0,75501486	7,8965527
7	2736	43,750%	-0,55275214	7,91425228
8	2808	50,000%	-0,36651292	7,94022777
9	3120	56,250%	-0,19033933	8,04558828
10	4224	62,500%	-0,01935689	8,34853783
11	4512	68,750%	0,151132538	8,41449579
12	4752	75,000%	0,32663426	8,46632086
13	4896	81,250%	0,515201894	8,49617382
14	8404	87,500%	0,732099368	9,03646306
15	8544	93,750%	1,019781441	9,05298456

Tabla 13. Alineación de datos de MANTENIBILIDAD para Weibull.
Fuente: Autores

No. Dato j	Datos de reparaciones (en horas) “t _j ”.	$F(t) = j / N + 1$	$Y = \text{Ln}(\text{Ln}(1/(1-F(t))))$	$X = \text{Ln}(t_j)$
1	0,9	6,25%	-2,740493007	-0,105360516
2	1,7	12,50%	-2,013418678	0,530628251
3	1,8	18,75%	-1,571952527	0,587786665
4	1,9	25,00%	-1,245899324	0,641853886
5	2	31,25%	-0,981647055	0,693147181
6	2,1	37,50%	-0,755014863	0,741937345
7	2,15	43,75%	-0,552752143	0,765467842
8	2,5	50,00%	-0,366512921	0,916290732
9	3,4	56,25%	-0,190339326	1,223775432
10	3,9	62,50%	-0,019356889	1,360976553
11	3,95	68,75%	0,151132538	1,373715579
12	4	75,00%	0,32663426	1,386294361
13	5	81,25%	0,515201894	1,609437912
14	767	87,50%	0,732099368	6,642486801
15	768	93,75%	1,019781441	6,643789733

5. Luego, hallamos la alineación de los datos para Weibull, y se incluyen los resultados en las anteriores tablas.

La alineación hallada, debe cumplir con los criterios descritos en el numeral 3.2.1, en su inciso 5. En este punto se debe hacer una salvedad, debemos calcular la mantenibilidad de la bomba con los valores de los datos de $j = 1$ hasta $j = 13$, ya que las actividades de “desmontaje de la bomba para restitución cíclica”, están demasiado dispersos de la media de los datos, ya que esta actividad no es rutinaria y solo se viene implementando cada 26000 horas de funcionamiento de la bomba.

6. Ahora, se calculan los parámetros de Weibull, de escala Eta (η) y de forma (β). De acuerdo a las ecuaciones 12 y 13. Seguidamente se calculan los valores de *MTBF* y *MTTR*; y por último, se define en qué fase de la curva de Davies se encuentra el equipo bajo estudio²⁶, de acuerdo al valor del parámetro (β) de la confiabilidad. Los resultados obtenidos son los siguientes:

²⁶ Se utiliza el software “Cálculo de CMD” diseñado por Mora, 2009.

Tabla 14. Parámetros de Weibull para la Confiabilidad.
Fuente: Autores

CONFIABILIDAD Distribución de Weibull	
β	1.551
η	4143.497
<i>MTBF</i>	3726.28

Tabla 15. Parámetros de Weibull para la Mantenibilidad.
Fuente: Autores

MANTENIBILIDAD Distribución de Weibull	
β	2.121
η	3.1
<i>MTTR</i>	2.77

$$A_I = 99.93 \%$$

Se observa que, el parámetro (β) tiene un valor de 1.551, para la confiabilidad. Lo cual indica que el equipo se encuentra en la etapa I de la fase III de la Curva de Davies ($1.05 \leq \beta < 1.95$).

En esta etapa, la rata de fallas empieza a incrementarse en forma constante y suave, lo cual puede contrarrestarse al utilizar la táctica de RCM y la técnica de análisis de modos de falla y de sus causas (*FMECA*).

Es evidente, que la pérdida de producción de la bomba es debido, en su mayoría, a los mantenimientos planeados como es el caso de “desmontaje de la bomba para restitución cíclica”; para este caso, se recomienda el monitoreo por condición, con el fin de alargar los tiempos entre estos mantenimientos planeados ($MTBM_P^{27}$).

Por otra parte, se observa que la actividad de desmontaje de la bomba para restitución cíclica realizada actualmente cada 26000 horas, aproximadamente. No impacta en los otros tiempos de mantenimiento: “limpieza de la cámara de succión” y de “pintura general”. Esto es debido a que la tarea de pintura general y muchas veces la de limpieza de la cámara de succión, se llevan a cabo aprovechando la parada de la bomba por mantenimiento realizados a otros equipos, como por ejemplo el motor.

Esto hace necesario que se haga una discriminación de las tareas de mantenimiento tanto correctivas como proactivas, mediante el entendimiento y la diferenciación de las tareas planeadas (preventivas o predictivas) frente a las acciones imprevistas (correctivas o modificativas), que generen cese de la producción o (*DT*), para obtener un cálculo del CMD más fiel a la realidad. Para el

²⁷ *Media Time Between Maintenance*

caso en particular de la empresa ACUACAR S.A., debe realizarse un análisis completo de los datos suministrados al sistema de información y del sistema de información en sí mismo.

Históricamente, en la mayoría de las empresas que pretenden implementar una de las tácticas de mantenimiento, sufren el mismo inconveniente de tener que devolverse a niveles inferiores de la jerarquía de niveles bajo el enfoque sistémico²⁸. La empresa ACUACAR S.A. no sería la excepción a la regla, si pretende implementar la táctica de mantenimiento RCM,

Un buen sistema de información de mantenimiento (*CMMS*²⁹), es necesario para determinar todos los signos vitales y valores de CMD necesarios para poder consolidar una adecuada táctica de mantenimiento. Dentro de la información que debe manejarse en el sistema, están los siguientes ítems:

- Registro de todos los equipos, partes y componentes, al menos hasta tres niveles.
- Generación y control de todas las órdenes de trabajo.
- Desarrollo de solicitudes de trabajo de mantenimientos realizadas por cualquier funcionario de la empresa, con rangos de validación.
- Planes de mantenimiento de corto, mediano y largo plazo.
- Inventario y gestión de repuestos en insumos.

²⁸ MORA GUTIERRES Alberto, *Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios*, editorial AMG, Envigado Antioquia, 2009. pág. 51 y 163.

²⁹ *Computerized Maintenance Management System*.

- Solicitudes automáticas de compra cuando haya cantidades de repuestos e insumos mínimas.
- Salarios e historial de todos los trabajadores de la empresa, por áreas.
- Costos de todos los recursos de mantenimiento y producción, de operación, de sustitución, de alistamiento y de mantenimiento de equipos.
- Costos fijos variables y financieros de No Confiabilidad de todas las órdenes de trabajos y equipos.
- Registro minuto a minuto de: operación y mantenimiento de equipos, tiempos de fallas y reparaciones, de tiempos administrativos y de demora, tiempos de suministros, tiempos de *ready time* o de cualquier otro tiempo pertinente para el cálculo del CMD.
- Fácil comunicación con el sistema de información central de la empresa y con otros software de la compañía.
- Sistemas de cálculo de RPN, CMD, TPM, RCM, etc.
- Sistemas de administración, registro, evaluación y gestión de proveedores y de terceros en la operación y gestión del mantenimiento y producción.

Es muy recomendable contar con un sistema de información bien desarrollado, que tenga características de tiempo real, antes de comenzar con la implementación del RCM en la empresa (Mora, 2009).

4.3 IMPLEMENTACION DE RCM EN LA EBAC DOLORES

Para la implementación de RCM en la Estación de Bombeo de Dolores, se utilizará la metodología descrita en el numeral 3.1. Siguiendo este orden de ideas, se responderán las tres primeras preguntas claves de dicha metodología:

- ¿Cuáles son las funciones y estándares de ejecución?
- ¿En qué forma se pierde la función o no se cumplen los estándares de ejecución?
- ¿Qué causa cada falla funcional?

Para lograr lo anterior, primero se definirán las fronteras del sistema EBAC Dolores, con el fin de delimitar los subsistemas a estudiar.

Y luego, se hará un listado con las características técnicas de los principales equipos presentes en esta estación e inmediatamente se identificarán sus funciones, (principales y secundarias), con el fin de ver con mayor claridad la relación entre los estándares de funcionamiento y las funciones descritas.

4.3.1 Fases 1, 2, 3, 4 y 5: Listado de Equipos, Fronteras del sistema³⁰, Funciones de cada subsistema, listar las fallas funcionales y los modos de falla

Cada equipo³¹ en el registro de una planta debe haberse adquirido para unos fines específicos. Para el caso de la estación de bombeo de agua cruda de Dolores, los equipos de mayor impacto operacional son los siguientes:

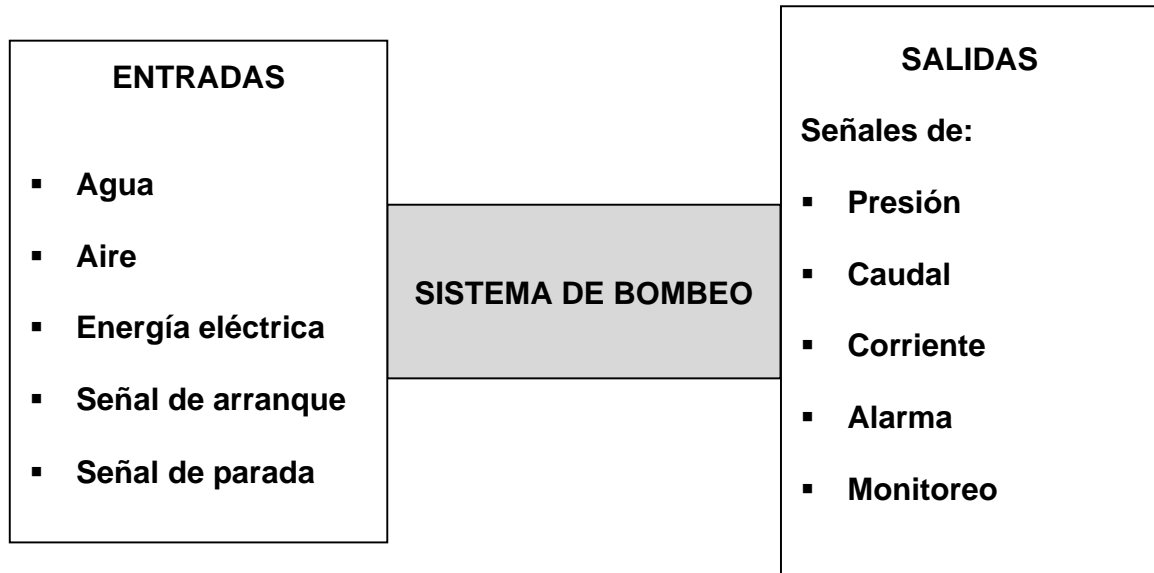
- Arrancadores.
- Transformadores.
- Motores.
- Bombas.

La EBAC de Dolores está ubicada entre el sistema lagunar Juan-Gómez Dolores y la EBAC de Piedrecitas.

³⁰ Se toma como sistema a la EBAC de Dolores

³¹ Para propósitos de este trabajo los reconocemos como subsistemas

Figura 13. Diagrama de entradas y salidas del sistema de bombeo
Fuente: Los autores



Se registrarán en diferentes tablas los subsistemas que componen el sistema de bombeo de Dolores (motores, transformadores, arrancadores y bombas); y luego, se codificarán las funciones y fallas funcionales de cada subsistema, definiendo cada modo de falla de acuerdo al código asignado. El número 0 para la función principal y los números 1, 2, 3,... para las funciones secundarias.

Tabla 16. Funciones y fallas funcionales de los arrancadores.
Fuente: Autores

ARRANCADORES		
Función	Falla Funcional	Descripción
<p>0-Conectar y desconectar el motor que acciona la bomba, a un circuito eléctrico trifásico que tiene un nivel de voltaje de 4160 volts con una frecuencia de 60 Hz para su operación normal.</p>	<p>0-A-Al conectar el motor no recibe voltaje de ninguna de las fases del circuito eléctrico.</p>	<p>0-A-1 El interruptor del arrancador está abierto</p> <p>0-A-2 Los contactos móviles del arrancador no alcanzan a cerrar correctamente</p>
	<p>0-B-Al conectar el motor solo recibe voltaje de dos fases del circuito eléctrico.</p>	<p>0-B-1 Apertura de fase del circuito eléctrico del operador de red</p> <p>0-B-2 Un contacto móvil del arrancador no cierra correctamente</p> <p>0-B-3 Fusible abierto en transformador principal</p>
	<p>0-C-Al conectar el motor solo recibe voltaje de una fase del circuito eléctrico.</p>	<p>0-C-1 Dos contactos móviles del arrancador no cierran correctamente</p>
	<p>0-D-Al desconectar el motor continúa recibiendo las tres fases del circuito eléctrico.</p>	<p>0-D-1 Bobina de desenganche del arrancador abierta</p> <p>0-D-2 Pulsador de apertura no hace buen contacto</p>
	<p>0-E-Al desconectar el motor continúa recibiendo dos fases del circuito eléctrico.</p>	<p>0-E-1 Dos contactos móviles del arrancador se fundieron y se soldaron con sus respectivos contactos fijos</p>
	<p>0-F-Al desconectar el motor continúa recibiendo una fase del circuito eléctrico.</p>	<p>0-F-1 Un contacto móvil del arrancador se fundió y se soldó con su respectivo contacto fijo</p>
	<p>1-Asegurar que la conexión/desconexión se realice a las tres fases.</p>	<p>1-A-Al conectar el motor al circuito eléctrico este no arranca.</p>
<p>1-A-2 Bobina de cierre del arrancador está abierta</p>		
<p>1-A-3 Pulsador de apertura no hace buen contacto</p>		

	1-B- Al desconectar el motor del circuito eléctrico este no se detiene.	1-B-1 Bobina de desenganche del arrancador abierta 1-B-2 Contactos móviles del arrancador fundidos y soldados con su respectivo contacto fijo
2- Evitar que se produzcan explosiones en contactos de conexión/desconexión.	2-A- Al arrancar el motor actúa la protección de corto circuito.	2-A-1 Contactos del arrancador en mal estado
3- Accionar con la energía almacenada de los resortes todos los contactos móviles, ya sean auxiliares o principales.	3-A- Los resortes no cargan energía.	3-A-1 Motor de accionamiento para carga en corto 3-A-2 Motor de accionamiento para carga abierto 3-A-3 Mecanismo de accionamiento del resorte suelto
4- Contar el número de maniobras de conexión/desconexión que realice el arrancador.	4-A- Al conectar el motor al circuito eléctrico, el contador de maniobras no cambia su registro.	4-A-1 Contador de maniobras sin energía 4-A-2 Contador de maniobras en mal estado 4-A-3 Contador de maniobras sin energía 4-A-4 Contador de maniobras en mal estado
5- Proteger al motor de cualquier falla censada por las protecciones.	5-A- Falló el bobinado de estator del motor y el arrancador no abrió sus contactos.	5-A-1 Bobina de desenganche del arrancador abierta
6- Aislar del resto del sistema donde se encuentra instalado, cualquier falla presentada en el motor.	6-A- Falló el bobinado de estator del motor y el arrancador no abrió sus contactos.	6-A-1 Bobina de desenganche del arrancador abierta 6-A-2 Interruptor principal del arrancador con contactos pegados

Tabla 17. Funciones y fallas funcionales de los transformadores.
Fuente: Autores

TRANSFORMADORES		
Función	Falla Funcional	Descripción
<p>0-Transformar el voltaje de 34.500 volts trifásicos a 60 Hz, suministrados por el proveedor, a 4160 volts trifásicos (desfasados 120° eléctricos) a 60 Hz, para la operación de los motores. Impidiendo que se produzcan desbalances de voltajes superiores a 2%, para la operación de los motores, de acuerdo a IEEE 1159.</p>	<p>0-A-El voltaje transformado en el secundario está por debajo de los 3800 volts.</p>	<p>0-A-1 Problemas en la generación del proveedor</p> <p>0-A-2 Problemas de regulación de voltaje del proveedor</p>
	<p>0-B-El voltaje transformado en el secundario está por encima de 4600 volts.</p>	<p>0-B-1 Problemas en la generación del proveedor</p> <p>0-B-2 Problemas de regulación de voltaje del proveedor</p>
	<p>0-C-El voltaje transformado en el secundario tiene una frecuencia superior a 60.5 Hz.</p>	<p>0-C-1 Problemas en la generación del proveedor</p>
	<p>0-D-El voltaje transformado en el secundario tiene una frecuencia inferior a 59.5 Hz.</p>	<p>0-D-1 Problemas en la generación del proveedor</p>
	<p>0-E-El registrador de voltaje transformado en el secundario no registra una de las tres fases.</p>	<p>0-E-1 Rotura de conductor de fase de la red interna en lado de alta tensión</p>
		<p>0-E-2 Rotura de conductor de fase de la red interna en lado de baja tensión</p>
		<p>0-E-3 El registrador local de voltaje está averiado</p>
		<p>0-E-4 Rotura interna de conductor en bobinado primario del transformador</p>
		<p>0-E-6 Rotura interna de conductor en bobinado secundario del transformador</p>
	<p>0-E-7 Falla en cierre de contacto del interruptor lado de alta tensión del transformador</p>	

		0-E-8 Falla en cierre de contacto del interruptor lado de baja tensión del transformador
	0-F- Se presenta un desbalance en el voltaje secundario superior al 2%, y un ángulo de desfase entre fases diferentes a 120° eléctricos.	0-F-1 Falta de compensación de fases en red de distribución del proveedor 0-F-2 Falta de compensación de fases en la carga monofásica del transformador
	0-G- El registrador de voltaje no registra ningún voltaje en el secundario.	0-G-1 Perdida de alimentación por parte del proveedor
		0-G-2 Falla en el interruptor del lado de alta tensión
		0-G-3 Falla en el interruptor del lado de baja tensión
		0-G-4 El registrador local de voltaje está averiado
1- Almacenar dentro de su cuba todo el aceite requerido para refrigerar su parte activa.	1-A- El nivel de aceite en la cuba está por debajo del nivel mínimo.	1-A-1 El transformador presenta fuga de aceite 1-A-2 El transformador se le suministro una cantidad de aceite inferior a la de diseño
	1-B- El nivel de aceite en la cuba está por encima del nivel máximo.	1-B-1 El transformador se encuentra sobre presionado 1-B-2 El transformador se encuentra recalentado por sobrecarga 1-B-3 El transformador se le suministro una cantidad de aceite superior a la de diseño
2- Evitar que el aceite para refrigeración de su parte activa entre en contacto directamente con la atmosfera.	2-A- El aceite presenta alto contenido de humedad.	2-A-1 El aceite presenta fallas de sellado por empaques
		2-A-2 El des humectador de Silica-Gel está falto de mantenimiento
		2-A-3 No se utiliza la Silica-Gel adecuada
3- Permitir el intercambio del calor contenido en el aceite con el exterior, por medio de sus radiadores.	3-A- El transformador presenta temperatura por encima de 90° C.	3-A-1 Tuberías de radiadores para conexión a cuba presentan obstrucciones
		3-A-2 Válvulas de radiadores para conexión a cubas están cerradas parcial o totalmente

Tabla 18. Funciones y fallas funcionales de los motores.
Fuente: Autores

MOTORES		
Función	Falla Funcional	Descripción
<p>0-Accionar la bomba a una velocidad de rotación de 1175 rpm, absorbiendo de la red eléctrica una potencia de 1125 kw a un voltaje de 4160 voltios.</p>	0-A- El motor presenta sobre velocidad.	0-A-1 Alta frecuencia en el circuito eléctrico de alimentación
	0-B- El motor presenta disparo por sobrecarga.	0-B-1 La bomba se encuentra atascada
		0-B-2 Cojinetes de bomba con tolerancia inferior a 0.012"
		0-B-3 Tolerancia en impulsores de la bomba inferior a 0.018"
	0-C- El motor presenta rotación inversa a la normal.	0-C-1 Rotación de fases inversa en el circuito eléctrico de alimentación
		0-C-2 Rotación de fases inversa en la red Distribución
	0-D- El motor presenta temperatura superior a 120° C en su bobinado de estator.	0-D-1 Filtros de ventilación obstruidos
		0-D-2 Tolerancia en impulsores de la bomba inferior a 0.018"
		0-D-3 Cojinetes de bomba con tolerancia inferior a 0.012"
	0-E- El motor presenta alta vibración.	0-E-1 Desbalanceo en impulsores de la bomba
		0-E-2 Desbalanceo en rotor del motor
		0-E-3 Desbalanceo en acople conjunto motor-bomba
		0-E-4 Des alineamiento del conjunto motor-bomba
		0-E-5 Rodamiento superior del motor en mal estado

	0-F -El motor presenta ruido en su parte superior.	0-F-1 Rodamiento superior del motor en mal estado
	0-G -El motor presenta disparo por cortocircuito.	0-G-1 Tolerancia en impulsores de la bomba inferior a 0.018"
	0-H -El motor presenta disparo por sub carga.	0-G-2 Atascamiento de impulsores de la bomba
		0-H-1 Rotura eje de transmisión
	0-I -El motor presenta temperatura superior a 100° C en su rodamiento superior.	0-H-2 Rotura eje de bomba
		0-I-1 Intercambiador de calor obstruido
1 -Mantener el sentido correcto de rotación de la bomba.	1-A -El motor gira en sentido inverso	0-I-2 Nivel de aceite en rodamiento por debajo del mínimo
		1-A-1 Rotación de fases inversa en el circuito eléctrico de alimentación
2 -Mantener la velocidad correcta de rotación de la bomba.	2-A -El motor gira a velocidad superior a 1200 rpm	1-A-2 Rotación de fases inversa en la red Distribución
		2-A-1 Alta frecuencia en el circuito eléctrico de alimentación
3 -Sostener el peso total de la bomba.	2-B -El motor gira a velocidad inferior 1150 rpm	2-B-1 Baja frecuencia en el circuito eléctrico de alimentación
		3-A-1 Circuito eléctrico de alimentación en dos fases
3 -Sostener el peso total de la bomba.	3-A -El motor no arranca	3-A-2 Bobina de cierre del arrancador está abierta
		3-B-1 Atascamiento de impulsores de la bomba
4 -Contener el aceite requerido para refrigerar sus rodamientos.	3-B -Se produce disparo instantáneo del interruptor.	4-A-1 Intercambiador de calor obstruido
		4-A-2 Nivel de aceite en rodamiento por debajo del mínimo
4 -Contener el aceite requerido para refrigerar sus rodamientos.	4-A -El motor presenta temperatura superior a 100° C en su rodamiento superior.	4-B-1 Sello de mirilla en mal estado
		4-C-1 Rodamiento superior del motor en mal estado
4 -Contener el aceite requerido para refrigerar sus rodamientos.	4-B -El motor presenta fuga de aceite en por mirilla de visualización de nivel aceite.	4-C-2 Nivel de aceite en rodamiento por debajo
		4-C-2 Nivel de aceite en rodamiento por debajo
4 -Contener el aceite requerido para refrigerar sus rodamientos.	4-C -El motor presenta ruido en su parte superior.	

		del mínimo
5- Permitir dar la carrera requerida por la bomba para su operación correcta.	5-A- El motor arranca y actúa la protección instantánea de corto circuito.	5-A-1 Tolerancia en impulsores de la bomba inferior a 0.018”

Tabla 19. Funciones y fallas funcionales de las bombas.
Fuente: Autores

BOMBAS		
Función	Falla Funcional	Descripción
<p>0-Bombear hacia el embalse de la estación Piedrecitas un caudal de agua cruda de 3300 m3/hrs, captada del sistema lagunar Juan Gómez-Dolores-Bohórquez, a una presión mínima de 6.5 bar y una presión máxima de 9.5 bar, a través de (2) tuberías paralelas de 1125 y 1000 mm de diámetro cada una.</p>	<p>0-A-El caudal bombeado es inferior a 3300 m3/hr.</p>	0-A-1 Agua bombeada con alto contenido de sólidos
		0-A-2 Válvula de impulsión controlada
		0-A-3 Impulsores con desgaste muy pronunciado
		0-A-4 Válvula de cheque con problema de apertura
		0-A-5 Canastilla de succión obstruida
	<p>0-B-La presión de impulsión es inferior a 6.5 bar.</p>	0-B-1 Impulsores con desgaste muy pronunciado
		0-B-2 Agua bombeada con alto contenido de sólidos
		0-B-3 Tuberías de impulsión con alto contenido de aire
	<p>0-C-La presión de impulsión es superior a 9.5 bar.</p>	0-C-1 Válvula de impulsión controlada
		0-C-2 Válvula de cheque con problema de apertura
	<p>0-D-La bomba presenta alta vibración.</p>	0-D-1 Desbalanceo en impulsores de la bomba
		0-D-2 Desbalanceo en acople conjunto motor-bomba
		0-D-3 Des alineamiento del conjunto motor-bomba
		0-D-4 Desbalanceo en rotor del motor

	0-E -La bomba presenta alto ruido.	0-E-1 Tolerancia en impulsores de la bomba inferior a 0.018"
1 -Mantener el nivel del agua en el embalse de la estación de bombeo Piedrecitas en un valor entre 1250 y 2300 mm, con el fin de que esta última estación de bombeo se mantenga operativa.	1-A -El nivel de agua en embalse de estación Piedrecitas, no asciende por encima 1250 mm.	1-A-1 Válvula de impulsión controlada
		1-A-2 Impulsores con desgaste muy pronunciado
		1-A-3 Válvula de cheque con problema de apertura
		1-A-4 Canastilla de succión obstruida
		1-A-5 Rotura en tubería de impulsión
		1-A-6 Caudal de bombeo en estación Piedrecitas superior a 3300 m3/hr
2 -Achicar cámaras de succión para mantenimiento de las mismas.	2-A -Al achicar las cámaras de succión, estas no bajan el nivel del agua.	2-A-1 Compuerta de cámara de succión no cierra
3 -Evitar el ingreso de sólidos con diámetros superior a ½", hacia el interior de la tubería de impulsión.	3-A -El agua recibida en el embalse de Piedrecitas, presenta sólidos suspendidos.	3-A-1 Agua bombeada con alto contenido de sólidos
4 -Mantener refrigerados con el agua bombeada los rodamientos del motor.	4-A -Los rodamientos del motor aumentan su temperatura por encima de 100° C	4-A-1 Intercambiador de calor obstruido

4.3.2 Fases 6 y 7: Analizar los efectos y criticidad de las fallas y Seleccionar tareas *costo – efectivas* para evitar la falla

En este punto, se propone responder las cuatro siguientes preguntas claves de la metodología de RCM (numeral 3.1):

- ¿Qué ocurre cuando sucede una falla?
- ¿En qué sentido es importante cada falla?
- ¿Qué puede hacerse para prevenir cada falla funcional?
- ¿Qué puede hacerse si no se conoce forma alguna de prevención?

Para saber qué ocurre cuando sucede una falla, debemos analizar los efectos mediante un análisis de criticidad. Para este nuevo análisis, se tomaran como criterios de evaluación las consecuencias de las fallas según se describió en el numeral 3.1.4,

Se debe hacer la aclaración, que dichos criterios son similares a los que se usaron para seleccionar a cuál estación de bombeo se debía aplicar la metodología RCM, (numeral 3.2). Sin embargo, el cálculo del riesgo total se realiza valorando los diferentes aspectos que determinan la severidad de la falla, calificándolos de 1 a 10, por el personal involucrado en la implementación del RCM.

Podemos utilizar unas ecuaciones análogas a las ecuaciones [1] y [2].

HOJA DE TRABAJO DE DECISIÓN PARA LOS ARRANCADORES

HOJA DE TRABAJO DE DECISIÓN PARA LOS ARRANCADORES															
Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				Tareas Proactivas ³²			Tareas "A falta de"			Tareas propuestas	Frecuencia inicial	A realizar por
F	FF	FM	H	S	E	O	H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	H4	H5	S4			
0	A	1	N	N	N	S	S	N	N	N	N	N	Revisar superficie de contactos	Cada 30 maniobras	Especialista en arrancadores
0	A	2	N	N	N	S	S	N	N	N	N	N			
0	B	1	S	N	N	S						N	Considerar autogeneración de energía	Cada 30 maniobras	Especialista en arrancadores

³² H1/S1/O1/N1: Tarea a condición, H2/S2/O2/N2: Tarea de reacondicionamiento cíclico, H3/S3/O3/N3: Tarea de sustitución cíclica, H4: Búsqueda de Falla, H5: Rediseño, S4: Operar hasta la falla.

F	FF	FM	H	S	E	O	H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	H4	H5	S4	Tareas propuestas	Frecuencia inicial	A realizar por
0	B	2	N	N	N	S	S	N					Revisar superficie de contactos	Cada 30 maniobras	Especialista en arrancadores
0	B	3	S	N	N	S					N				
0	C	1	N	N	N	S	S	N							
0	D	1	N	N	N	S						N	Considerar arrancador de suplencia		
0	D	2	N	N	N	S					N				
0	E	1	N	N	N	S	S	N					Revisar superficie de contactos	Cada 30 maniobras	Especialista en arrancadores
0	F	1	N	N	N	S	S	N							
1	A	1	S	N	N	S						N	Considerar autogeneración de energía		

F	FF	FM	H	S	E	O	H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	H4	H5	S4	Tareas propuestas	Frecuencia inicial	A realizar por
1	A	2	N	N	N	S						N	Considerar arrancador de suplencia		
1	A	3	N	N	N	S					N				
1	B	1	N	N	N	S					N				
1	B	2	N	N	N	S	S	N					Revisar superficie de contactos	Cada 30 maniobras	Especialista en arrancadores
2	A	1	N	N	N	S	S	N							
3	A	1	N	N	N	S						N	Considerar arrancador de suplencia		
3	A	2	N	N	N	S					N				
3	A	3	N	N	N	S					N				
4	A	1	S	N	N	N	N						Ningún mantenimiento		

F	FF	FM	H	S	E	O	H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	H4	H5	S4	Tareas propuestas	Frecuencia inicial	A realizar por
4	A	2	S	N	N	N	N						Ningún mantenimiento		
4	B	1	S	N	N	N	N								
4	B	2	S	N	N	N	N								
5	A	1	N	N	N	N						N	Considerar arrancador de suplencia		
6	A	1	N	N	N	N						N			
7	A	1	N	N	N	N	S	N					Revisar superficie de contactos	Cada 30 maniobras	Especialista en arrancadores

HOJA DE TRABAJO DE DECISIÓN PARA LOS TRANSFORMADORES

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				Tareas Proactivas ³³			Tareas "A falta de"			Tareas propuestas	Frecuencia inicial	A realizar por
F	FF	FM	H	S	E	O	H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	H4	H5	S4			
0	A	1	S	N	N	N							Considerar regulación automática de voltaje		
0	A	2	S	N	N	N							Considerar regulación automática de voltaje		
0	B	1	S	N	N	N							Considerar regulación automática de voltaje		
0	B	2	S	N	N	N							Considerar regulación automática de voltaje		

³³ H1/S1/O1/N1: Tarea a condición, H2/S2/O2/N2: Tarea de reacondicionamiento cíclico, H3/S3/O3/N3: Tarea de sustitución cíclica, H4: Búsqueda de Falla, H5: Rediseño, S4: Operar hasta la falla.

F	FF	FM	H	S	E	O	H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	H4	H5	S4	Tareas propuestas	Frecuencia inicial	A realizar por
0	C	1	S	N	N	N							Considerar regulación automática de voltaje		
0	D	1	S	N	N	N							Considerar regulación automática de voltaje		
0	E	1	N				S						Inspeccionar acometidas eléctricas	Cada (3) meses	Grupo de Mantenimiento
0	E	2	N				S						Inspeccionar acometidas eléctricas	Cada (3) meses	Grupo de Mantenimiento
0	E	3	S				N	N	S				Reposición registradores de voltaje	Cada (12) meses	Grupo de Mantenimiento
0	E	4	N				N	N	N	N	N		Reparar		Fabricante
0	E	5	N				N	N	N	N	N		Reparar		Fabricante
0	E	6	N				N	N	S				Revisar superficie de contactos	Cada 30 maniobras	Especialista en arrancadores
0	E	7	N				N	N	S				Revisar superficie de contactos	Cada 30 maniobras	Especialista en arrancadores

F	FF	FM	H	S	E	O	H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	H4	H5	S4	Tareas propuestas	Frecuencia inicial	A realizar por
0	F	1	S	N	N	N							Considerar autogeneración de Energía		
0	F	2	S	N	N	N							Considerar autogeneración de Energía		
0	G	1	S	N	N	N							Considerar autogeneración de Energía		
0	G	2	S	N	N	N							Considerar arrancador de suplencia		
0	G	3	S	N	N	N							Considerar arrancador de suplencia		
0	G	4	S				N	N	S				Reposición registradores de voltaje	Cada (12) meses	Grupo de Mantenimiento
1	A	1	S	N	S	S							Inspeccionar hermeticidad de la cuba	Cada (3) meses	Grupo de Mantenimiento
1	A	2	S	N	N	N							Inspeccionar nivel de aceite en la cuba	Diariamente	Operación
1	B	1	N	S									Inspeccionar temperatura del Transformador	A cada hora	Operación

F	FF	FM	H	S	E	O	H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	H4	H5	S4	Tareas propuestas	Frecuencia inicial	A realizar por
1	B	2	S	S	S								Inspeccionar temperatura del Transformador	A cada hora	Operación
1	B	3	S	N	N	N							Inspeccionar nivel de aceite en la cuba	Diariamente	Operación
2	A	2	N	N	S								Reposición de empaques	Cada (12) meses	Mantenimiento
2	A	3	N	N	N	N	N	N					Ningún Mantenimiento		
3	A	1	N				N	S					Filtrado de aceite	Cada (5) años	Contratista
3	A	2	N				S						Inspección válvulas	Cada (30) días	Operación

HOJA DE TRABAJO DE DECISIÓN PARA LOS MOTORES

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				Tareas Proactivas ³⁴			Tareas "A falta de"			Tareas propuestas	Frecuencia inicial	A realizar por
F	FF	FM	H	S	E	O	H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	H4	H5	S4			
0	A	1	S	N	N	N									
0	B	1	N				N	N	N	N	N		Ningún Mantenimiento		
0	B	2	N				N	N	S				Ampliar tolerancia de cojinetes al valor estándar		Contratista
0	B	3	N				N	N	S				Ampliar tolerancia de Impulsores al valor estándar		Contratista

³⁴ H1/S1/O1/N1: Tarea a condición, H2/S2/O2/N2: Tarea de reacondicionamiento cíclico, H3/S3/O3/N3: Tarea de sustitución cíclica, H4: Búsqueda de Falla, H5: Rediseño, S4: Operar hasta la falla.

F	FF	FM	H	S	E	O	H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	H4	H5	S4	Tareas propuestas	Frecuencia inicial	A realizar por
0	C	1	N				N	N	N	N	N		Ningún Mantenimiento		
0	C	2	N				N	N	N	N	N		Ningún Mantenimiento		
0	D	1	S	N	N	S	S						Limpieza de filtros	Cada (2) semanas	Personal de mantenimiento
0	D	2	N				N	N	S				Ampliar tolerancia de Impulsores al valor estándar		Contratista
0	D	3	N				N	N	S				Ampliar tolerancia de cojinetes al valor estándar		Contratista
0	E	1	N				S						Balancear Impulsores	Cada (3) meses	Contratista
0	E	2	N				S						Balancear Impulsores	Cada (3) meses	Contratista
0	E	3	N				S						Balancear acoples	Cada (3) meses	Contratista
0	E	4	N				S						Realizar alineamientos	Cada (3) meses	Personal de Mantenimiento

F	FF	FM	H	S	E	O	H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	H4	H5	S4	Tareas propuestas	Frecuencia inicial	A realizar por
0	E	5	N				N	N	S				Reponer rodamientos	Cada (25.000) horas	Personal de Mantenimiento
0	F	1	N				N	N	S				Reponer rodamientos	Cada (25.000) horas	Personal de Mantenimiento
0	G	1	N				N	N	S				Ampliar tolerancia de Impulsores al valor estándar		Contratista
0	G	2	N				N	N	N	N	N		Ningún Mantenimiento		
0	H	1	N				N	N	S				Reponer eje	Cada (20.000) horas	Contratista
0	H	2	N				N	N	S				Reponer eje	Cada (20.000) horas	Contratista
0	I	1	N				S						Inspeccionar Intercambiador de calor	Cada (20.000) horas	Personal de Mantenimiento
0	I	2	S	N	N	N							Inspeccionar nivel de aceite	Diariamente	Personal de operaciones
1	A	1	N				N	N	N	N	N		Ningún Mantenimiento		

F	FF	FM	H	S	E	O	H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	H4	H5	S4	Tareas propuestas	Frecuencia inicial	A realizar por
1	A	2	N				N	N	N	N	N		Ningún Mantenimiento		
2	A	1	S	N	N	N									
2	A	2	S	N	N	N									
3	A	1	N				N	N	N	N	N		Ningún Mantenimiento		
3	A	2	N				N	N	N	N	N		Ningún Mantenimiento		
3	B	1	N				N	N	N	N	N		Ningún Mantenimiento		
4	A	1	N				S						Inspeccionar Intercambiador de calor	Cada (20.000) horas	Personal de Mantenimiento
4	A	2	S	N	N	N							Inspeccionar nivel de aceite	Diariamente	Personal de operaciones
4	B	1	N				S						Reponer mirilla		Personal de mantenimiento

F	FF	FM	H	S	E	O	H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	H4	H5	S4	Tareas propuestas	Frecuencia inicial	A realizar por
4	C	1	N				N	N	S				Reponer rodamientos	Cada (25.000) horas	Personal de Mantenimiento
4	C	2	S	N	N	N							Inspeccionar nivel de aceite	Diariamente	Personal de operaciones
5	A	1	N				N	N	S				Ampliar tolerancia de Impulsores al valor estándar		Contratista

HOJA DE TRABAJO DE DECISIÓN PARA LAS BOMBAS

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				Tareas Proactivas ³⁵			Tareas "A falta de"			Tareas propuestas	Frecuencia inicial	A realizar por
F	FF	FM	H	S	E	O	H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	H4	H5	S4			
0	A	1	S	N	N	S	S						Limpiar rejilla de cámara con sistema automático	Cada hora	Mecánico
0	A	2	S	N	N	S	S						Verificar estado de válvula	Cada (12) horas	Operadores
0	A	3	N				N	S					Reparar impulsores	Cada 24.000 horas	Contratista
0	A	4	S	N	N	S	N	S					Mantenimiento a válvula	Anualmente	Contratista

³⁵ H1/S1/O1/N1: Tarea a condición, H2/S2/O2/N2: Tarea de reacondicionamiento cíclico, H3/S3/O3/N3: Tarea de sustitución cíclica, H4: Búsqueda de Falla, H5: Rediseño, S4: Operar hasta la falla.

F	FF	FM	H	S	E	O	H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	H4	H5	S4	Tareas propuestas	Frecuencia inicial	A realizar por
0	A	5	S	N	N	S	S						Limpiar rejilla de cámara con sistema automático	Cada hora	Mecánico
0	B	1	N				N	S					Reparar impulsores	Cada 24.000 horas	Contratista
0	B	2	S	N	N	S	S						Limpiar rejilla de cámara con sistema automático	Cada hora	Mecánico
0	B	3	N	S									Mantenimiento válvulas ventosas	Semanalmente	Contratista
0	C	1	S	N	N	S	S						Verificar estado de válvula	Cada (12) horas	Operadores
0	C	2	S	N	N	S							Mantenimiento válvula de cheque	Anualmente	Contratista
0	D	1	N	S									Medir vibraciones	Cada (3) meses	Contratista
0	D	2	N	S									Medir vibraciones	Cada (3) meses	Contratista
0	D	3	N	S									Medir vibraciones	Cada (3) meses	Contratista

F	FF	FM	H	S	E	O	H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	H4	H5	S4	Tareas propuestas	Frecuencia inicial	A realizar por
0	D	4	N	S									Medir vibraciones	Cada (3) meses	Contratista
0	E	1	N	N	S								Maquinar anillos de desgaste		Contratista
1	A	1	S	N	N	S	S						Verificar estado de válvula	Cada (12) horas	Operadores
1	A	2	N				N	S					Reparar impulsores	Cada 24.000 horas	Contratista
1	A	3	S	N	N	S							Mantenimiento válvula de cheque	Anualmente	Contratista
1	A	4	S	N	N	S	S						Limpiar rejilla de cámara con sistema automático	Cada hora	Mecánico
2	A	1	S	N	N	S	S						Limpiar rejilla de cámara con sistema automático	Cada hora	Mecánico
3	A	1	S	N	N	S							Mantenimiento tubería de enfriamiento	Cada (3) mese	Mecánico

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha observado que el mantenimiento de sustitución cíclica, realizado a las bombas, es el de mayor costo por el tiempo involucrado y por el costo de los repuestos. Para el caso del tiempo involucrado, el cual por recomendación de fabricantes oscila entre 24.000 y 25.000 horas de operación, resulta en ocasiones innecesario la sustitución cíclica, debido a que al cumplirse el tiempo recomendado el equipo aun cuenta con un desgaste, el cual aun puede impulsar el caudal y la presión adecuada para el cual fue adquirido. Para el caso de los repuestos, específicamente impulsores, los cuales son de importación, su costo en promedio resulta ser entre un 30% y 40% del costo total de la bomba, además de su tiempo de entrega desde su país de origen que tarda entre (8) y (10) meses. Con base en lo anterior, se recomienda el monitoreo por condición de aquellos parámetros como vibraciones y alineamiento con el fin de realizar el reemplazo de los elementos o repuestos de las bombas cuando lleguen a un estado específico, donde su funcionamiento se vea reflejado en el comportamiento de la bomba; es decir, se recomienda que a través del análisis de vibraciones, se reconozca dicho estado y se implemente el cambio por condición de la maquina y no por el número de horas. Con lo anterior, se obtiene un mejor aprovechamiento de los altos costos causados por el reacondicionamiento cíclico y la adquisición de repuestos, conservando la calidad de la prestación del servicio.

Se recomienda una mayor evolución de los primeros niveles y categorías del mantenimiento bajo enfoque sistémico; con el fin de lograr mayores resultados en la aplicación de RCM en la empresa ACUACAR S.A. Un sistema de información en tiempo real, que proporcione información detallada acerca de los tiempos de mantenimiento, tiempos de falla, unidades de horas útiles sin fallas, medidas de tiempos de retraso y demoras en la realización del mantenimiento y adquisición de suministros, historia de repuestos y de reparaciones, personal involucrado, costos de ordenes de trabajo realizadas, etc; necesarios para calcular la disponibilidad operacional, la cual a su vez, es la disponibilidad que más se ajusta a la realidad del mantenimiento. Sin embargo, la medición del CMD, debe iniciarse en equipos o sistemas simples, para afianzar su metodología; para luego seguir su implementación en sistemas mucho más complejos.

El correcto dimensionamiento de las consecuencias de las fallas y de sus posibles causas, conlleva a diseñar estrategias de mantenimiento proactivo que pueden maximizar la calidad del servicio. Por esta razón, debe establecerse un completo estudio de criticidad en los equipos que más impactan a la función principal de la empresa; asumiendo de esta forma, que la empresa es un sistema que tiene una o varias funciones principales y secundarias. En otras palabras, se puede aplicar el concepto básico de RCM a la compañía en sí misma bajo un enfoque sistémico; combinándolo coherentemente, con otras tácticas de mantenimiento como por ejemplo las 5 S y el *Kaisen* o mejoramiento continuo.

El Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, es una forma de pensamiento que debe ser asumido por todo el departamento encargado del mantenimiento, con el objetivo de identificar las actividades de mantenimiento a realizar, con sus respectivas frecuencias, a los equipos más importantes dentro de su contexto operacional. Implementando un equipo de trabajo multidisciplinario, se desarrolla un sistema de gestión del mantenimiento flexible que se adapta a las necesidades reales de mantenimiento de la empresa, involucrando temas como la seguridad personal, el medio ambiente, las operaciones y la razón *costo-efectivas* de las acciones realizadas.

BIBLIOGRAFIA

ARZUAGA, José Luis y Gutiérrez, Luis Felipe; Análisis de confiabilidad en los equipos de bombeo de aguas residuales, Monografía de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físico Mecánica. 2004.

BURGOS, Omar Andrés y Lobelo, Álvaro Luis. Estudio de confiabilidad de los equipos críticos de la línea de producción planta 1 de PROPILCO S.A. y la línea de producción compuestos 3 de ALJOVER S.A., Monografía de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físico Mecánica. 2009.

CUSGUEN, Duban y García, Javier. Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad para transformadores de potencia de alta y media tensión instalados en el sistema de distribución de CODENSA S.A. ESP., Monografía de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físico Mecánica. 2009.

MORA GUTIERREZ, Alberto. Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios. Medellín: AMG, 2009.

OLIVEIRO GARCIA, Palencia, La cultura de la confiabilidad operacional. VI Congreso Internacional de Mantenimiento. Optimización del Mantenimiento basada en la distribución de Weibull Duitama: Universidad Tecnológica y Pedagógica de Colombia.