

**DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN
CONFIABILIDAD RCM PARA EL SISTEMA DE AIRE Y GASES DE
CALDERA DE LA CENTRAL TERMOGUAJIRA, GECELCA S.A. E.S.P.**

**KEVIN RIAÑO MOLINA
LAURA DANIELA TORRES MARTÍNEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA**

2017

**DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN
CONFIABILIDAD RCM PARA EL SISTEMA DE AIRE Y GASES DE
CALDERA DE LA CENTRAL TERMOGUAJIRA, GECELCA S.A. E.S.P.**

**KEVIN RIAÑO MOLINA
LAURA DANIELA TORRES MARTÍNEZ**

**Monografía de Grado presentada para optar al título de
Especialista en Gerencia de Mantenimiento**

**Director
JORGE CÁRCAMO
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

Dedico esta monografía a mi familia, a Simón y Emma, mis dos hijos y a mi esposa María que fue un gran apoyo para mí. Son ellos los que me motivan a ser cada vez una mejor persona.

KEVIN RIAÑO MOLINA

DEDICATORIA

Primero que nada le doy gracias a Dios, por darme la oportunidad de tener el tiempo, la dedicación y los recursos para realizar esta especialización.

Dedico mi monografía a mi familia quienes siempre me han apoyado y motivado a continuar siempre en constante educación y crecimiento profesional.

A mi futuro esposo, Cesar, quien fue quien me dio el impulso y el apoyo para hacer la especialización.

A mi compañero de monografía, que sin él este proyecto no hubiese sido posible

A todos mis compañeros y profesores de la especialización que hicieron un gran aporte para que este periodo fuera de gran aprendizaje

LAURA TORRES MARTÍNEZ

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. CONTEXTO ORGANIZACIONAL.....	20
1.1. GECELCA S.A. E.S.P.	20
1.1.1. Reseña histórica	20
1.1.2. Central Térmica Termoguajira	21
1.1.3. Servicios	21
1.1.4. Misión	22
1.1.5. Visión	22
1.1.6. Organigrama.....	23
1.1.7. Ubicación geográfica.....	24
2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	25
2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	25
2.2. JUSTIFICACIÓN DEL PLAN PROPUESTO	27
2.3. OBJETIVO.....	28
2.3.1. Objetivo general.....	28
2.3.2. Objetivos específicos	28
3. ANALISIS DE LA LITERATURA RECOPIADA	29
3.1. MARCO CONCEPTUAL.....	29
3.1.1. El cambiante mundo del mantenimiento	29
3.1.2. Evolución del mantenimiento	30
3.1.3. Mantenimiento centrado en confiabilidad	36
3.1.4. El RCM: Siete Preguntas Básicas.....	38

3.1.5. Ventajas y limitaciones del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad – RCM	43
3.1.6. Sistema de aire y gases de caldera	45
4. ANÁLISIS DE CRITICIDAD A SISTEMA DE AIRE Y GASES	55
4.1. APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CRITICIDAD	59
4.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CRITICIDAD	62
5. CONTEXTO OPERACIONAL	64
5.1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE VENTILADOR DE TIRO FORZADO	
67	
5.2. FUNCIONAMIENTO	69
5.3.1. Impulsor	73
5.3.2. Compuertas de entrada	74
5.3.3. Unidad de fluido	75
5.3.5. Cojinete	77
5.3.6. Sistema de lubricación	78
5.3.7. Chumacera	79
5.3.8. Eje.	79
5.4. ESTADÍSTICA DE FALLA	79
5.4.1. Estadísticas de fallas características de Ventiladores centrífugos..	80
5.5.1. Frecuencia de falla por componentes Ventiladores de Tiro Forzado.....	81
5.5.2. Fallas del Ventilador de Tiro Forzado	83
6. ANALISIS DE CRITICIDAD VENTILADOR DE TIRO FORZADO.....	84
7. ANÁLISIS DE MODOS DE FALLAS Y EFECTOS DE FALLAS POTENCIALES (AMFE).....	86
7.1. BENEFICIOS DEL AMFE.....	87
7.2. DEFINICIÓN DE FRONTERAS	87

7.3. IDENTIFICACIÓN DE FUNCIONES Y FALLAS	88
7.4. FALLA FUNCIONAL	89
7.5. MODO DE FALLA	89
7.6. EFECTOS DE FALLA	90
7.7. CONSECUENCIAS	91
7.8. RESULTADO DE FMEA DE ÍTEMS MANTENIBLES Y TAREAS DE MANTENIMIENTO PROPUESTAS	91
7.9. ANÁLISIS DE MODOS DE FALLAS Y EFECTOS DE FALLAS POTENCIALES (AMFE) DE VENTILADOR DE TIRO FORZADO	92
7.10. HOJA DE DECISIÓN RCM.....	95
8. CONCLUSIONES	101
BIBLIOGRAFIA	102
ANEXOS.....	106
ANEXO A. Tratamiento de la información.....	106
ANEXO B. Análisis de criticidad.....	107
ANEXO C. Hoja de información y Hoja de Decisión RCM	108

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Sistema de aire y gases de calderas Termoguajira	59
Tabla 2: Historial de fallas para el periodo Enero 2010 - Marzo 2017 de equipos del sistema de aire y gases	60
Tabla 3: Criterios para evaluación de criticidad	61
Tabla 4: Parámetros de nivel de criticidad	62
Tabla 5: Resultados Análisis de Criticidad Sistema Aire y Gases.....	62
Tabla 6: Metodología de Mantenimiento para los equipos del Sistema Aire y Gases de Caldera	63
Tabla 7: Características Técnicas Ventilador Tiro forzado.....	68
Tabla 8: Sistemas de Regulación de Ventiladores.....	71
Tabla 9: Partes del Ventilador de Tiro Forzado	72
Tabla 10: Porcentaje de fallas estadísticos de los componentes de Ventilador	80
Tabla 11: Porcentaje de falla por componente en Ventilador de Tiro forzado ..	82
Tabla 12: Porcentaje de Falla en Ventilador de Tiro Forzado	83
Tabla 13: Resultados análisis de criticidad de componentes ventilador tiro forzado.....	85

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Ilustración 1: Central Térmica Termoguajira	21
Ilustración 2: Estructura organizacional GECELCA S.A. E.S.P.	23
Ilustración 3: Vista Tipo tierra Planta Termoguajira	24
Ilustración 4: Vista Tipo mapa Planta Termoguajira.....	24
Ilustración 5: Acciones posibles de realizar antes o después de la falla (Etapa I y/o II).....	32
Ilustración 6: Cambios en los puntos de vista sobre la falla de un equipo	34
Ilustración 7: Cambios en técnicas de mantenimiento	35
Ilustración 8: Evolución histórica.....	36
Ilustración 9: Algunas Normas que gobiernan el RCM	37
Ilustración 10: Beneficios del mantenimiento centrado en confiabilidad	44
Ilustración 11: Planta generadora de energía eléctrica con caldera de vapor de alta presión y turbogenerador de vapor conectado, condensador, calentadores de agua de alimentación y bomba de alimentación de agua de caldera.....	46
Ilustración 12: Ventilador de Tiro Forzado	48
Ilustración 13: Ventilador de aire de ignición	49
Ilustración 14: Ventilador de aire primario.....	50
Ilustración 15: Ventilador aire de sello	51
Ilustración 16: Ventilador de tiro inducido	52
Ilustración 17: Ventilador cámara de TV y fotocelda.....	53
Ilustración 18: Pulverizador de carbón.....	54
Ilustración 19: Flujograma para evaluación de criticidad	58
Ilustración 20: Partes del Ventilador de Tiro Forzado	67
Ilustración 21: Curva característica de funcionamiento de ventiladores de tiro forzado.....	69
Ilustración 22: Plano de Ventilador de Tiro Forzado	72
Ilustración 23: Plano de álabes de compuerta de entrada	74
Ilustración 24: Unidad de fluido.....	76

Ilustración 25: Cojinete lado acople y lado libre	78
Ilustración 26: Eje de ventilador	79
Ilustración 27: Gráfica Porcentaje de fallas estadísticas de los componentes de Ventilador.....	81
Ilustración 28: Gráfico Porcentaje de falla por componente en Ventilador de Tiro forzado.....	82
Ilustración 29: Gráfica de Porcentaje de Falla de Ventiladores de Tiro Forzado	83
Ilustración 30: Definición de fronteras.....	88
Ilustración 31: Modelo Hoja de Decisión RCM.....	95
Ilustración 32: Diagrama de Decisión - Parte 1	97
Ilustración 33: Diagrama de decisión RCM - Parte II	98

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Tratamiento de la información.....	106
ANEXO B. Análisis de criticidad.....	107
ANEXO C. Hoja de información y Hoja de Decisión RCM.....	108

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD RCM PARA EL SISTEMA DE AIRE Y GASES DE CALDERA DE LA CENTRAL TERMOGUAJIRA, GECELCA S.A. E.S.P.¹

AUTORES:

Kevin Riaño Molina

Laura Daniela Torres Martínez

PALABRAS CLAVES: Generación de energía, disponibilidad, confiabilidad, sistema de aire y gases, RCM, modos de falla, diagrama de decisiones tareas de mantenimiento.

DESCRIPCIÓN:

Esta monografía se realizó con el fin de dar respuesta a la necesidad presenta en la Central Termoguajira en cuanto a la disponibilidad y confiabilidad de los equipos. Hoy en día, las empresas dedicadas a la generación de energía tienen una gran responsabilidad debido a la gran demanda existente en Colombia para el despacho de energía a las diferentes regiones del país.

Para mantener los equipos disponibles y que permanezcan en operación durante largos periodos de tiempo para cumplir con las necesidades del país y participar activamente en el mercado de energía, el departamento de Mantenimiento de Gecelca S.A. E.S.P. debe ir más allá de los estándares de trabajo normales e iniciar un plan de acción para todos los equipos críticos de la central. El sistema de aire y gases es uno de los sistemas que mayor impacto operacional tiene en la generación de energía, es por eso que se decidió realizar un plan de mantenimiento basado en la metodología RCM o Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Para efectuar el proceso de RCM se realizó la identificación de los modos y efectos de las fallas y sus consecuencias. Para efectuar todo este proceso se aplicó el diagrama de decisiones de RCM con el fin de determinar cuáles eran las tareas de mantenimiento adecuadas para prevenir o eliminar la falla y su frecuencia de ejecución.

¹ Monografía de Grado

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Especialización en Gerencia de Mantenimiento, Director de la Monografía Ing. Jorge Cárcamo Aroca

ABSTRACT

TITLE:

DESIGN OF A RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE PLAN RCM FOR GECELCA S.A. E.S.P., CENTRAL TERMOGUAJIRA AIR AND GAS SYSTEM.²

AUTHORS:

Kevin Riaño Molina

Laura Daniela Torres Martínez

KEY WORDS: Energy generation, availability, reliability, air and gas system, RCM, failure modes, decision diagram, maintenance tasks.

DESCRIPCIÓN:

This monograph was done in order to give an answer to the present need in Central Termoguajira in terms of the availability and reliability of the machines. Nowadays, companies dedicated to energy generation have a huge responsibility due to great demand that exists in Colombia for the dispatch of energy to the different regions of the country.

In order to keep equipment available and remaining in operation for large periods to accomplish the needs of the country and take part actively in the energy market, maintenance department must go beyond normal working standards and initiate an action plan for all critical equipment of Gecelca S.A. E.S.P. Air and gas system is one of the systems with the greatest operational impact in energy generation, that's why it was decided to do a maintenance plan based on RCM methodology or Reliability Centered Maintenance. To perform the RCM process, the identification of failure modes, effects and consequences was done. To develop this methodology, RCM decision diagram was applied in order to determinate which were the proper maintenance tasks to prevent or eliminate the failures and their execution frequency.

² Grade Monograph

Faculty of mechanical engineering, School of Mechanical Engineering. Maintenance Management Specialization., Director: Jorge Cárcamo Aroca, Mechanical Engineer

INTRODUCCIÓN

La competitividad, la eficiencia y la eficacia son factores que determinan la permanencia de las empresas en el cambiante mercado globalizado, en el caso de las generadoras termoeléctricas, tienen una mayor demanda debido los bajos niveles de agua de los embalses para la generación hidroeléctrica por los cambios en el clima que han dado largos periodos de sequía. Por esta razón Gecelca S.A E.S.P debe mantener una alta disponibilidad de sus dos unidades para garantizar energía a sus clientes.

Los planes de mantenimientos son herramientas que contribuyen a elevar la competitividad de las compañías cuando es una inversión que asegura la producción continua, motivo por el cual constantemente sufre cambios y mejoras tecnológicas y estratégicas con el fin de optimizar su gestión.

Determinar la estrategia de mantenimiento adecuada a partir de la revisión de las características técnicas y operativas de los equipos y los requerimientos específicos para estos. Con el tiempo, estos requerimientos han cambiado para los equipos y es por esto que el Departamento de Mantenimiento debe ir transformando sus técnicas para poder seleccionar tareas de mantenimiento apropiadas para lograr el objetivo de generar de forma continua, segura y costo efectivo.

La metodología RCM es una de las estrategias de mantenimiento que trabaja en base a las funciones del equipo y como mantener su funcionalidad, haciendo de su objetivo el anteponerse a la falla para conservar la confiabilidad de los equipos.

El RCM, para su aplicación efectiva, requiere del conocimiento de las fallas y modos de fallas del equipo y aplicar trabajos rutinarios para mitigar el problema. Para identificar las consecuencias de las fallas el RCM realiza las siguientes actividades:

- Integra una revisión de las fallas operacionales con la evaluación de aspectos de seguridad y amenazas al medio ambiente.
- Mantiene la atención en las actividades de mantenimiento que más incidencia tienen en el desempeño o funcionamiento de las instalaciones.

El RCM es una forma ideal para desarrollar planes de mantenimiento en equipos complejos y para los que no existe mucha documentación, apoyándose en la experiencia de los técnicos y operadores de los equipos, por eso el RCM utiliza un lenguaje sencillo y fácil de entender para todos los involucrados. Si el RCM se aplica a un sistema de mantenimiento existente, reduce la cantidad de mantenimiento rutinario que se ha hecho a un 40% a 70%

El RCM ha sido aplicado en diferentes tipos de empresas globalmente, pero en la industria petrolera y de energía es reciente, lo cual es una ventaja para estas empresas ya que genera ventajas competitivas.

1. CONTEXTO ORGANIZACIONAL

1.1. GECELCA S.A. E.S.P.

1.1.1. Reseña histórica. La GENERADORA Y COMERCIALIZADORA DE ENERGIA DEL CARIBE S.A ESP – GECELCA, es una empresa de servicios públicos mixta, de nacionalidad colombiana, constituida como sociedad por acciones, del tipo de las anónimas, sometidas al régimen de los servicios públicos domiciliarios y que ejercen sus actividades dentro del ámbito del derecho privado como empresario mercantil

Fue creada según escritura pública No 747 del 6 de Abril de 2006 y el 1 de febrero de 2007 se inició la operación comercial de GECELCA, sustituyendo a la Corporación Eléctrica de la Costa Atlántica S.A. ESP. – CORELCA, en el mercado de energía mayorista con sus correspondientes derechos y obligaciones, teniendo en cuenta que CORELCA capitalizó en GECELCA, los activos y algunos pasivos asociados a las actividades de generación y comercialización de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional, mediante el aporte en especie de los mismos y a cambio de acciones de GECELCA a nombre de CORELCA.

El domicilio principal se encuentra en la ciudad de Barranquilla, departamento del Atlántico, Republica de Colombia y tiene como objetivo satisfacer las necesidades de clientes nacionales e internacionales brindando solidez y respaldo al sistema eléctrico nacional y convirtiéndose en "Soporte Térmico" ante eventuales déficit de energía.³

³ <https://www.gecelca.com.co/index.php/empresa/resena-historica>

1.1.2. Central Térmica Termoguajira

Ilustración 1: Central Térmica Termoguajira



Fuente: Gecelca S.A. E.S.P.

GECELCA es propietaria y atiende directamente la operación y el mantenimiento de las unidades 1 y 2 de la Central Termoguajira con una capacidad efectiva de 151 MW cada una, ubicadas en jurisdicción del corregimiento de Mingueo, municipio de Dibulla, departamento de la Guajira.⁴

La planta está conformada por dos unidades turbo vapor Mitsubishi, con capacidad para generar con combustible gas y carbón. Esta dualidad de combustible y su ubicación geográfica le confiere un posicionamiento estratégico importante dentro del mercado de energía colombiano, constituyéndose en un importante respaldo energético de la región y el país.⁵

1.1.3. Servicios. GECELCA S.A. E.S.P., presta servicios integrales de venta de Energía Eléctrica como Generador y Comercializador a grandes usuarios no regulados y a otros agentes del mercado mayorista y en la Bolsa de Energía. Asimismo, realiza actividades de prestación de servicios de venta como Comercializador de Gas Natural.⁶

⁴ <https://www.gecelca.com.co/index.php/empresa/resena-historica>

⁵ <https://www.gecelca.com.co/index.php/generacion>

⁶ <https://www.gecelca.com.co/index.php/servicios/servicios-gecelca>

1.1.4. Misión Generar y comercializar energía con el propósito de satisfacer las necesidades de nuestros clientes, impulsando el desarrollo económico con servicios de alta calidad, fundamentados en el crecimiento integral de nuestro talento humano, el mejoramiento continuo y la preservación del medio ambiente, asegurando la rentabilidad económica esperada por nuestros accionistas, con alta responsabilidad social empresarial.⁷

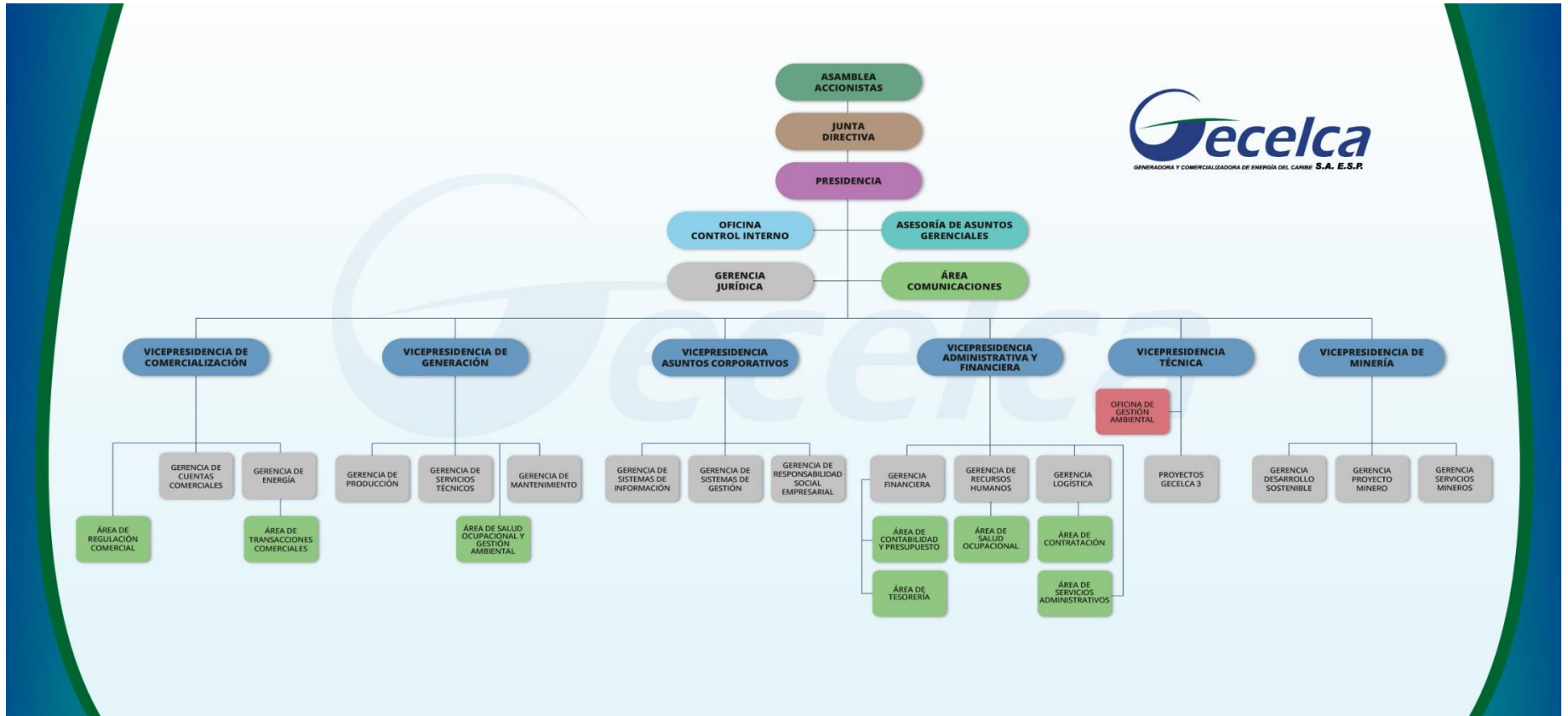
1.1.5. Visión Ser en el 2023 una empresa referente en la generación de energía firme, confiable y sustentable en el mercado energético nacional.⁸

⁷ <https://www.gecelca.com.co/index.php/empresa/quienes-somos/mision-y-vision>

⁸ <https://www.gecelca.com.co/index.php/empresa/quienes-somos/mision-y-vision>

1.1.6. Organigrama

Ilustración 2: Estructura organizacional GECELCA S.A. E.S.P.



Fuente: Gecelca S.A. E.S.P.

1.1.7. Ubicación geográfica

- Lote: Ciento cincuenta (150) hectáreas a seis (6) Kilómetros de Mingueo sobre la litoral Atlántico
- Coordenadas Geográficas: Latitud Norte 11°15'34", Longitud Oeste 73°24'14"
- Corregimiento: Mingueo, ochenta Kilómetros sobre la Troncal del Caribe.
- Municipio: Dibulla
- Departamento: Guajira
- País: Colombia

Ilustración 3: Vista Tipo tierra Planta Termoguajira



Fuente: Google Maps

Ilustración 4: Vista Tipo mapa Planta Termoguajira



Fuente: Google Maps

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las calderas de la central Termoguajira son unidades de combustión u hogar balanceado que utilizan ventiladores de tiro forzado (VTF) para suministrar aire de combustión, y ventiladores de tiro inducido (VTI) para succionar los gases de la caldera y descargarlos a la chimenea. Dichos ventiladores junto con los ventiladores de aire primario, ventiladores de aire de sello, ventiladores de ignición y los ductos de transporte son los equipos que introducen el aire total en caldera y conforman uno de los principales sistemas para la generación de energía, el sistema de manejo de aire y gases.

Las unidades de la central Termoguajira son de tipo dual, es decir que pueden trabajar con dos combustibles, en este caso carbón y gas; durante varios años de operación las unidades trabajaban a lo sumo 1 o 2 veces al mes usando el gas como principal combustible de generación, por lo que el nivel del mantenimiento a los equipos no era tan demandante.

Debido al requerimiento comercial y en búsqueda del crecimiento de la empresa, Gecelca se vio en la necesidad de hacerse una compañía más competitiva, y es por eso que decidió habilitar el sistema de manejo y quemado de carbón de las unidades haciendo del carbón el combustible principal para la generación de energía, ya que el precio de MW/h generado a partir del carbón es menor que el generado a partir del gas. Con el nuevo precio de MW/h ofertado por Gecelca, la empresa logro estar en el mismo nivel de competencia que las hidroeléctricas del país. Todos estos cambios se tradujeron en un aumento del factor de utilización de las unidades debido a que fueron llamadas a generar con mayor frecuencia, consecuencia de la disminución del costo que representaba el MWh generado con carbón.

Ya hace 10 años que sucedió este cambio organizacional, lo que conllevó a un cambio radical en el departamento de mantenimiento de Termoguajira. A medida que pasan los años el mantenimiento ha ido creciendo y evolucionando, pero aun así presenta falencias que no ha permitido hacer del mantenimiento de Gecelca un mantenimiento de clase mundial, es por eso que se deben seguir trabajando en las bases y estrategias de mantenimiento actuales, especialmente aquellas dirigidas al sistema de aire y gases, y así evitar la frecuencia y ocurrencia de las fallas.

Las fallas en el sistema de aire y gases que conforman las unidades de combustión son diversas y pueden llegar a ser críticas para la disponibilidad y operatividad de las centrales térmicas. Escape de gases, abrasión o corrosión de cojinete o ducto, suministro pobre de aceite, agitación, sobrecarga de accionador, sobrecalentamiento y vibración excesiva del cojinete son de las fallas que mayor impacto puede generar en la confiabilidad del equipo y que pueden ser causas de grandes pérdidas en la producción.

2.2. JUSTIFICACIÓN DEL PLAN PROPUESTO

Las calderas de la central Termoguajira entraron en operación en el año 1983, desde ese año hasta la fecha se han venido aplicando las mismas estrategias de mantenimiento indicados por el fabricante Mitsubishi, sin tener en cuenta el tiempo de servicio que lleva el equipo, ni el desgaste de sus componentes. Adicionalmente, en la central Termoguajira no se tienen en cuenta las nuevas tecnologías o mejoras en los repuestos de equipos que nos ofrece el mercado, siendo que estas pueden resultar en un impacto positivo en la disponibilidad y confiabilidad de los activos, especialmente en aquellos que se califican como críticos. Por esta razón es que se hace necesario realizar un estudio de las fallas que se han presentado a lo largo de los años en los sistemas que componen la caldera, con el fin de plantear nuevos procesos para las estrategias de mantenimiento existentes y aplicar mejoras en el diseño del equipo en cuestión.

El presente trabajo pretende establecer un plan de mantenimiento para el sistema de aire y gases de la caldera ya que, además de ser un sistema que representa un impacto económico alto en el mantenimiento, está compuesto por uno de los equipos más críticos para la generación, el ventilador de tiro forzado. Dicho plan de mantenimiento apunta a establecer actividades que permitan actuar preventivamente ante las posibles fallas que puedan presentarse en el sistema y establecer acciones de mejora que se pueden aplicar al diseño de los equipos para evitar las fallas repetitivas que se presentan durante la operación; esto con el objetivo de garantizar su disponibilidad, reducir costos de mantenimiento y evolucionar con respecto al mantenimiento que actualmente se viene ejecutando en la central.

2.3. OBJETIVO

2.3.1. Objetivo general. Diseñar un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad RCM para el sistema de aire y gases de caldera de la central Termoguajira, Gecelca S.A. E.S.P.

2.3.2. Objetivos específicos

- Identificar los equipos críticos del sistema de aire y gases de la caldera de la Central Termoguajira.
- Especificar el tipo metodología de mantenimiento a aplicar a cada equipo dependiendo de su criticidad.
- Realizar un análisis de modo de falla y efectos en los equipos a aplicar la metodología RCM.
- Crear la hoja de decisión de la metodología RCM para asignar las actividades de mantenimiento de cada equipo con el fin de aumentar la confiabilidad y disponibilidad del sistema.

3. ANALISIS DE LA LITERATURA RECOPIADA

3.1. MARCO CONCEPTUAL

3.1.1. El cambiante mundo del mantenimiento. Durante los pasados 20 años, el mantenimiento cambió, quizás mucho más que cualquier otra disciplina de gerenciamiento. El cambio se debe a un enorme incremento en el número y variedad de bienes físicos (plantas, equipos, edificios) que deben ser mantenidos alrededor del mundo, diseños mucho más complejos, nuevas técnicas de mantenimiento, y cambiante ideología con respecto a la organización y responsabilidades del mantenimiento.

Estos cambios están poniendo a prueba al máximo actitudes y capacidades en todas las ramas de la industria, los jefes de las diversas áreas persiguen una estructura estratégica que sintetice los nuevos desarrollos en un patrón coherente, de manera que puedan ser evaluados sensiblemente, permitiendo escoger aquellos que más se adapten a ellos y a sus empresas.

El mantenimiento centrado en la Confiabilidad. (RCM) se describe como la filosofía que provee justamente esa estructura ideológica. Si se aplica correctamente, el RCM transforma la relación entre la empresa que lo usa, sus bienes físicos existentes y el personal que opera y mantiene esos bienes. Además, permite que nuevos bienes sean puestos eficientemente en servicio, con gran velocidad, confianza y precisión.⁹

⁹ MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. Pág. 6, México: Aladon, 2004.

3.1.2. Evolución del mantenimiento. La historia del mantenimiento como parte estructural de las empresas, data desde la aparición de las máquinas para la producción de bienes y servicios, inclusive desde cuando el hombre formaba parte de la energía de dichos equipos.¹⁰ Desde la década del '30 se puede seguir el rastro de la evolución del mantenimiento a través de tres generaciones.¹¹

La principal función de mantenimiento es sostener la funcionalidad de los equipos y el buen estado de las maquinas a través del tiempo, bajo esta premisa se puede entender la evolución del área de mantenimiento a través de las distintas épocas acorde a las necesidades de sus clientes, que son todas aquellas dependencias y/o empresas de procesos o servicios, que generan bienes reales o intangibles mediante la utilización de estos activos, para producirlos.

El progreso del mantenimiento permite distinguir varias generaciones evolutivas, en relación a los diferentes objetivos que se observaban en las áreas productivas o de manufactura a través del tiempo.¹² Teniendo esto en cuenta, a continuación, se describe los enfoques hacia las acciones de mantenimiento en las diferentes etapas de su evolución:

Primera Generación (Etapa I): Esta primera generación cubre el periodo que se extiende hasta la Segunda Guerra Mundial. En esos días la industria no estaba altamente mecanizada, por lo que el tiempo de parada de máquina no era de mayor importancia, por lo que la prevención de fallas en los equipos no era prioritaria. La mayoría de los equipos eran simples y sobredimensionados, lo que los hacía fáciles de reparar y confiables y no había necesidad de implementar un mantenimiento sistemático.¹³ Durante esta etapa aparecen los instrumentos de mantenimiento, se contrata o entrena el personal capacitado que lleva a cabo las primeras acciones de mantenimiento que son de tipo

¹⁰ MORA, Alberto. Mantenimiento Industrial efectivo. Pág. 20, Medellín: Coldi, 2008

¹¹ MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. Pág. 2, México: Aladon, 2004.

¹² MORA, Alberto. Mantenimiento Industrial efectivo. Pág. 20, Medellín: Coldi, 2008

¹³ MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. Pág. 2, México: Aladon, 2004.

correctivo (corrección de falla o parada imprevista prioritaria). En esta etapa aparecen los elementos iniciales para sostener los equipos tales como:

- Ordenes de trabajo
- Herramientas
- Utensilios
- Almacenes de repuestos e insumos
- Primeras informaciones que constituyen las bases de datos
- Desarrollo de técnicas y tecnologías propias de la empresa en particular.

En la etapa I la prioridad del área de producción es elaborar productos o generar servicios.¹⁴

Segunda Generación (Etapa II): Durante la Segunda Guerra Mundial todo cambio drásticamente, ya que la presión de los tiempos de guerra aumentó la demanda de bienes al mismo tiempo que descendía la cantidad de trabajadores industriales lo que conllevó a un aumento de la mecanización. En los años '50 había aumentado la cantidad y complejidad de las máquinas y la industria empezó a depender de ellas.¹⁵ El problema de las fallas imprevistas es la principal razón de la aparición de esta etapa, ya que el objetivo principal de la etapa II es solucionar las paradas repentinas de los equipos, por lo cual se empieza a ejecutar acciones de prevención o predicción de fallas, en esta fase empiezan a utilizarse técnicas y metodologías propias de las acciones planeadas de mantenimiento, la empresa adquiere el conocimiento y destreza para diferenciar las acciones de mantenimiento antes y después de la falla. Inician técnicas tales como:

- Rutinas de inspección
- Planes preventivos
- Mediciones
- Valoración de condición de estado de equipos
- Ensayos no destructivos

¹⁴ MORA, Alberto. Mantenimiento Industrial efectivo. Pág. 20, Medellín: Coldi, 2008

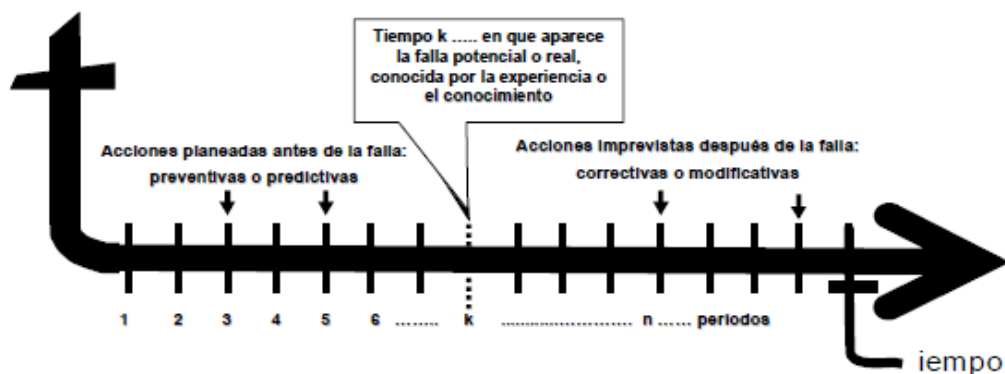
¹⁵ MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. Pág. 2, México: Aladon, 2004.

- Registro de datos técnicos
- Monitoreo de equipos
- Reposición de equipos antes que entren en estado de falla
- Control de vida útil de los elementos
- Medición de funcionalidad de dispositivos
- Ajustes de función antes de fallas
- Control operativo de equipos y sus elementos.

Durante esta etapa se hace distinción entre las acciones correctivas, modificativas, preventivas y predictivas; siendo las dos primeras posteriores a la falla y las ultimas, previas al estado de disfuncionalidad del equipo.

Además en esta etapa se lleva mejor control de la información ya que se inicia con la identificación de los equipos, determinación de tareas para intervenciones programadas, se definen recomendaciones de seguridad, se establecen planes de mantenimiento, se delimitan y generan las OT programadas y no programadas, se relacionan los equipos con los respectivos repuestos específicos, se concretan parámetros de subcontratación y administración de proveedores y se implementan mecanismos de manejo y recolección de datos de una forma sencilla y completa, que posteriormente se convierten en el sistema de información.¹⁶

Ilustración 5: Acciones posibles de realizar antes o después de la falla (Etapa I y/o II)



Fuente: MORA, Alberto. Mantenimiento Industrial efectivo. Pág. 22

¹⁶ MORA, Alberto. Mantenimiento Industrial efectivo. Pág. 21 – 22, Medellín: Coldi, 2008

Tercera generación: Desde mediados de la época de los '70 el proceso de cambio en la industria ha adquirido aún más impulso. Los cambios han sido clasificados en: nuevas expectativas (Etapa III), nuevas investigaciones (Etapa IV) y nuevas tecnologías (Etapa V).¹⁷ Una vez las empresas han alcanzado la madurez para el manejo real de las acciones posibles de mantenimiento, empiezan a adoptar una estructura para el desarrollo secuencial, lógico y organizado, se destacan entre ellas:

- TPM (Mantenimiento productivo total)
- RCM (Mantenimiento entrado en confiabilidad)
- Mantenimiento combinado TPM - RCM
- Mantenimiento proactivo
- WCM (Mantenimiento de clase mundial)
- Mantenimiento centrado en el riesgo
- Mantenimiento centrado en objetivos
- Mantenimiento centrado en resultados

Lo importante en esta fase para producción es maximizar la explotación y la combinación de sus factores productivos, en tanto que mantenimiento se constituye como una unidad independiente de producción.

En esta fase se interesan por medir resultados y pretenden saber que tan bien se hacen las cosas, es por eso que empiezan a establecer sistemas de costeo propios de mantenimiento como LCC, implementan el registro histórico de fallas y reparaciones, se establecen sistemas de medición bajo parámetros propios o internacionales.

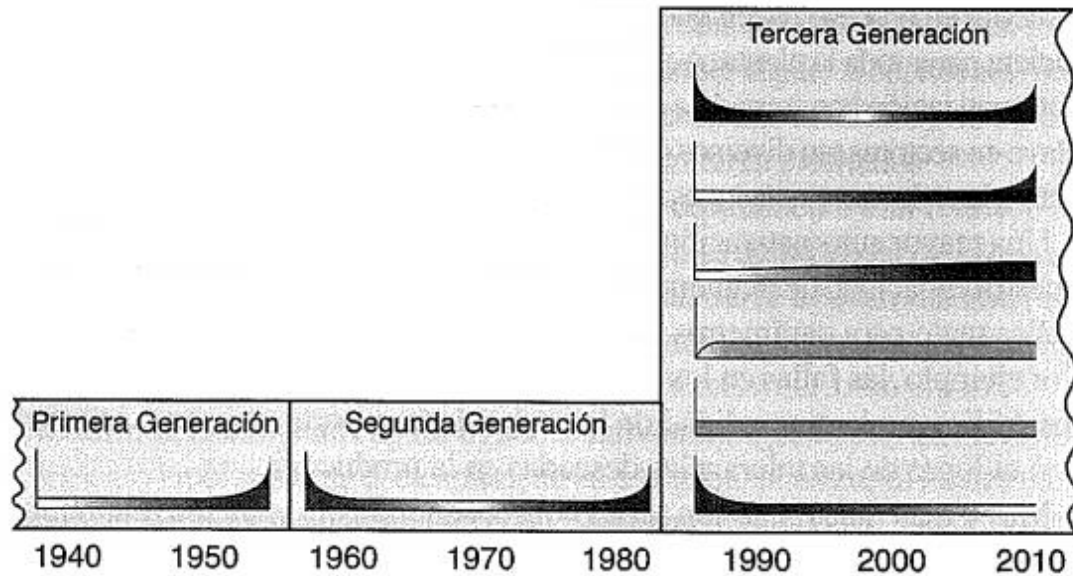
Empiezan a interpretar y a utilizar la curva de Davies (o de la bañera)¹⁸, en un principio la idea era simplemente que a medida que los elementos envejecían eran más propensos a fallar. Una creciente conciencia de la “mortalidad infantil” llevo a la Segunda Generación a creer en la curva de “bañera”. Sin embargo,

¹⁷ MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. Pág. 3, México: Aladon, 2004.

¹⁸ MORA, Alberto. Mantenimiento Industrial efectivo. Pág. 23, Medellín: Coldi, 2008

investigaciones en la Tercera Generación revelan seis patrones de falla que realmente ocurren en la práctica.¹⁹

Ilustración 6: Cambios en los puntos de vista sobre la falla de un equipo



Fuente: Libro RCM II John Moubry

En esta fase se involucran los directivos y todas las demás áreas corporativas de la empresa en un solo objetivo para obtener la mayor eficiencia productiva y la máxima reducción de costos. En este sistema se establecen metas alcanzables a todas las áreas involucradas, además de detectar las necesidades reales de desarrollo de personal y capacitación con el fin de que los miembros del área de mantenimiento alcancen niveles adecuados de calificación para aplicar nuevas tecnologías en proceso de gestión.

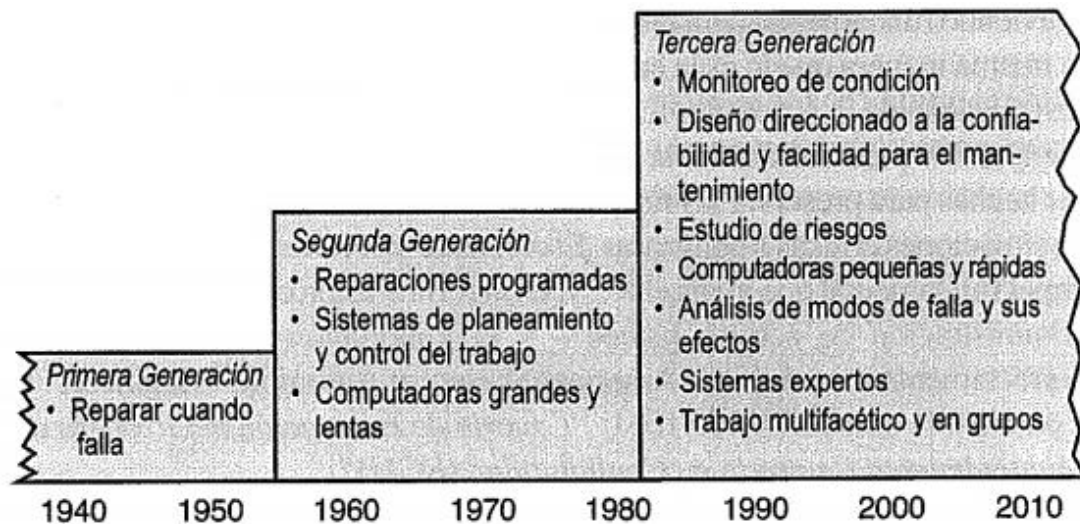
Ha habido un crecimiento explosivo de nuevos conceptos y técnicas de mantenimiento, muchos de ellos han sido desarrollados en los últimos veinte años, y emergen aún más cada semana. Los nuevos desarrollos incluyen:

- Herramienta de soporte para la toma de decisiones, tales como el estudio de riesgo, análisis de modos de fallas y sus efectos, y sistemas expertos.
- Nuevos métodos de mantenimiento, tales como monitoreo de condición

¹⁹ MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. Pág. 4, México: Aladon, 2004.

- Diseño de equipos, con mayor énfasis en la confiabilidad y facilidad para el mantenimiento
- Drástico cambio en el modo de pensar de la organización hacia la participación, trabajo en grupo y flexibilidad.²⁰

Ilustración 7: Cambios en técnicas de mantenimiento



Fuente: Libro Moubry

Se puede afirmar entonces que cuando la organización desarrolla y alcanza una metodología capaz de integrar todos y cada uno de los niveles anteriores se alcanza la etapa VI, definida como gestión de activos, la cual permite integrar todo el conocimiento y las mejores prácticas aprendidas, con el fin de manejar con flexibilidad y éxito sus activos.²¹

²⁰ MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. Pág. 5, México: Aladon, 2004.

²¹ MORA, Alberto. Mantenimiento Industrial efectivo. Pág. 25, Medellín: Coldi, 2008

Ilustración 8: Evolución histórica

Etapa	sucede aproximadamente	Producción - Manufactura		Mantenimiento e Ingeniería de Fábricas	
		Orientación hacia	Necesidad específica	Orientación hacia	Objetivo que pretende
I	antes de 1950	el producto	generar el producto	hacer acciones correctivas	reparar fallos imprevistos
II	entre 1950 y 1959	la producción	estructurar un sistema productivo	aplicar acciones planeadas	prevenir, predecir y reparar fallos
III	entre 1960 y 1980	la productividad	optimizar la producción	establecer tácticas de mantenimiento	gestar y operar bajo un sistema organizado
IV	entre 1981 y 1995	la competitividad	mejorar índices mundiales	implementar una estrategia	medir costos, CMD, compararse, predecir índices, etc.
V	entre 1996 y 2003	la innovación tecnológica	hacer la producción ajustada a la demanda	desarrollar habilidades y competencias	aplicar ciencia y tecnología de punta
VI	desde 2004	Gestión y operación integral de activos en forma coordinada entre ambas dependencias Gestión de activos			

Fuente: MORA, Alberto. Mantenimiento Industrial efectivo. Pág. 21

3.1.3. Mantenimiento centrado en confiabilidad. Desde el punto de vista de la ingeniería hay dos elementos que hacen al manejo de cualquier activo físico: debe ser mantenido y de tanto en tanto también necesita ser modificado. Todo activo físico es puesto en funcionamiento porque se espera de él que cumpla una función o ciertas funciones específicas, por ende, al mantener un activo el estado que se debe preservar es aquel en el que continúe haciendo aquello que los usuarios quieren que haga. Los requerimientos de los usuarios van a depender de donde y como se utilice el activo, esto lleva a definir formalmente el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad: proceso utilizado para determinar que se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual.²²

El mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) es una metodología en la cual se determina los requerimientos de mantenimiento de los bienes o equipos de una organización durante su fase operativa. Con el RCM se determina cuáles son los pasos a seguir para que un elemento cumpla con las funciones y niveles de desempeño establecidos por los usuarios y se mantengan durante el contexto operacional presente.

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) fue desarrollado inicialmente por la industria comercial de aviación para mejorar la seguridad y la confiabilidad de sus equipos. Fue documentado por primera vez en un

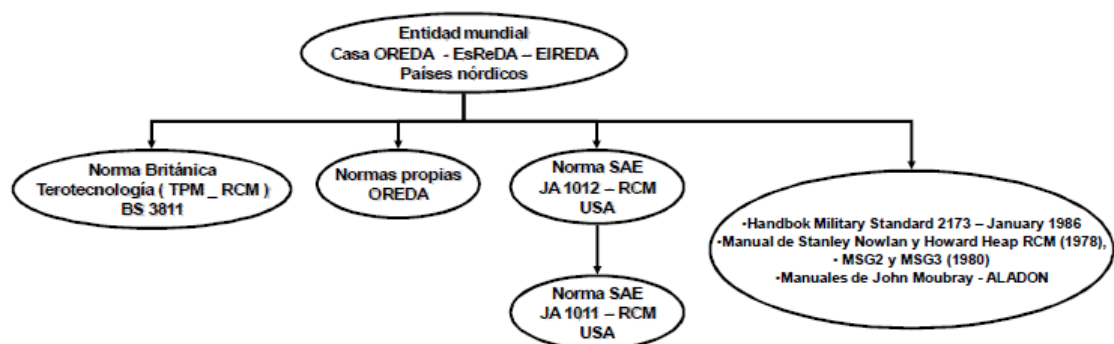
²² MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. Pág. 7, México: Aladon, 2004.

reporte escrito por F.S. Nowlan y H.F. Heap y publicado por el Departamento de Defensa de U.S. en 1978. Desde entonces, RCM ha sido utilizado para ayudar a formular estrategias de mantenimiento de activos físicos en casi todas las áreas de trabajo humano organizado, y en casi todos los países industrializados del mundo.²³

El modelo de mantenimiento centrado en confiabilidad definido por Nowlan y H.F. Heap ha servido de base para realizar mejoras en los diferentes procedimientos aplicados a las compañías, pero con el paso del tiempo se han ido agregando una gran variedad de exigencias las cuales sus autores definen como RCM, causando que los modelos actuales difieran significativamente del modelo original y como consecuencia se presentan casos en los que al aplicar estas nuevas estrategias no se logran cumplir las metas que Nowlan y H.F. Heap plantearon y hasta pueden ser activamente contraproducentes.

Por esta razón se vio la necesidad de crear una norma (*SAE JA1011—Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes*) donde se recopilará los criterios con los que debe cumplir cualquier proceso para ser llamado RCM.

Ilustración 9: Algunas Normas que gobiernan el RCM



Fuente: MORA, Alberto. Mantenimiento Industrial efectivo. Pág. 273

El RCM es una filosofía de gestión de mantenimiento que sirve de guía para identificar las actividades de mantenimiento con sus respectivas frecuencias a los activos más importantes de un contexto operacional. Su éxito se apoya

²³ SAE JA1011—Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes.

fundamentalmente en el análisis funcional de las fallas de un determinado contexto operacional, realizado por un equipo de trabajo multidisciplinario, el cual desarrolla un sistema de gestión de mantenimiento flexible que se adapta a las necesidades reales de mantenimiento de la organización, tomando en cuenta la seguridad del personal, el ambiente, las operaciones y la razón costo/beneficio. La filosofía del RCM se fundamenta en:

- Evaluación de los componentes de los equipos, su estado y función
- Identificación de los componentes críticos
- Aplicación de las técnicas de mantenimiento proactivo y predictivo
- Chequeo en sitio y en operación del estado corpóreo y funcional de los elementos mediante permanente revisión y análisis. ²⁴

Los objetivos del RCM son los siguientes:

- Eliminar las averías de las maquinas
- Suministrar fuentes de información de la capacidad de producción de la planta
- Minimizar costos de mano de obra de reparación, en base al compromiso de eliminación de fallas.
- Anticipar y planear con precisión las necesidades del mantenimiento
- Establecer horarios de trabajo más razonables para el personal de mantenimiento.
- Permitir a los departamentos de producción y mantenimiento una acción conjunta y sincronizada al momento de programar y mantener la capacidad de producción de la planta
- Incrementar los beneficios de explotación directamente mediante la reducción de presupuestos del departamento de mantenimiento. ²⁵

3.1.4. El RCM: Siete Preguntas Básicas El proceso de RCM incita a responder las siguientes siete preguntas sobre el bien o sistema bajo revisión:

²⁴ MORA, Alberto. Mantenimiento Industrial efectivo. Pág. 271, Medellín: Coldi, 2008

²⁵ MORA, Alberto. Mantenimiento Industrial efectivo. Pág. 272, Medellín: Coldi, 2008

1. *¿Cuáles son las funciones y respectivos estándares de desempeño de este bien en su contexto operativo presente?*

Inicialmente debe definirse el contexto operacional del activo, se entiende por contexto operacional como una descripción global breve de cómo se utilizará un activo, donde se utilizará, y los aspectos que gobiernan los criterios de desempeño global tales como producción, rendimiento, seguridad, integridad ambiental, y así sucesivamente.²⁶ Los aspectos específicos que se deben recopilar para definir el contexto operacional del activo son los siguientes:

- A. Proceso fluido versus proceso por lotes
- B. Estándares de calidad
- C. Estándares ambientales
- D. Estándares de seguridad
- E. Lugar de operaciones
- F. Intensidad de operaciones
- G. Redundancia
- H. Trabajo-durante-operación
- I. Repuestos
- J. Demanda del mercado/suministro de materia prima

En segundo lugar, el usuario debe definir las funciones, primarias y secundarias, que pretenden que sus bienes desempeñen, así:

- a. Funciones primarias: La razón del porque el bien fue adquirido en primer lugar. Esta categoría cubre temas tales como velocidad, rendimiento, capacidad de transportación o almacenamiento, calidad del producto y servicio al cliente.
- b. Funciones secundarias, que indican que se espera que todo bien produzca más que simplemente su función primaria. Los usuarios también tienen expectativas en áreas como ser seguridad, control, contención, confort, integridad estructural, economía, protección, eficiencia de operación,

²⁶ SAE JA1012— A Guide to Reliability-Centered Maintenance (RCM)

cumplimiento con las normas medioambientales, y hasta la estética o apariencia del bien.²⁷

Adicionalmente, se deben definir los estándares de desempeño en el contexto operacional que el usuario requiera para el activo o sistema al cual se le aplicara el proceso RCM.

2. *¿En qué aspecto no responde al cumplimiento de sus funciones?*

Cuando un equipo o bien no es capaz de cumplir con las funciones definidas total o parcialmente y no alcanza a llegar al nivel de desempeño establecido por los usuarios se le conoce como falla funcional. Las fallas de un activo se deben definir por pérdida de función específica y no como una falla general, ya que se pueden presentar fallas múltiples que deterioren el activo sin necesidad de que este deje de cumplir su función principal o viceversa. Al momento de definir las fallas funcionales del activo se deben establecer límites superiores e inferiores de desempeño, los cuales ayudaran en el control de funcionamiento del equipo e identificación del tipo de falla, ya que las fallas asociadas cuando se excede el límite superior son diferentes a cuando se está por debajo del límite inferior.²⁸

Para identificar el tipo de falla el proceso de RCM realiza estos dos niveles:

- a. Primero, identificando qué circunstancias llevaron a un estado fallido
- b. Luego investigando qué situaciones son las causantes de que un bien caiga en ese estado de falla.

3. *¿Que ocasiona cada falla funcional?*

Cuando ocurre una falla funcional se debe identificar cuáles fueron las causas o modos de falla del evento, dichos modos de fallas pueden ser aquellas fallas que han ocurrido en mismos equipos o similares, operando en el mismo contexto, fallas que actualmente están siendo prevenidas por regímenes de

²⁷ MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. Pág. 12, México: Aladon, 2004.

²⁸ SAE JA1012— A Guide to Reliability-Centered Maintenance (RCM)

mantenimiento ya existentes, y aquellas fallas que no ocurrieron aun, pero que se consideran como posibilidades muy reales en el contexto en cuestión.

Se deben identificar los modos de falla en un nivel de causalidad, los modos de falla deben ser descritos con suficiente detalle para hacer posible la selección de una política de manejo de fallas apropiada, pero no en tanto detalle que se invierta demasiado tiempo en el proceso de análisis. Las listas de los modos de falla deben incluir cualquier evento o proceso que probablemente pueda causar una falla funcional, incluyendo deterioro, defectos de diseño, y errores humanos que pueden ser causados por operadores o mantenedores.²⁹

4. *¿Qué sucede cuando se produce cada falla en particular?*

Cuando se produce una falla en particular, según el proceso de RCM se debe enlistar los efectos de las fallas, que describen lo que sucede cuando se presenta cada modo de falla. Esta descripción debe incluir toda la información necesaria para respaldar la evaluación de las consecuencias de las fallas, como ser,

- a. Evidencias, (si las hubiera), de que la falla ocurrió
- b. En qué manera, (si las hubiera), representa una amenaza para la seguridad del medioambiente.
- c. De qué modo, (si las hubiera) afecta la producción u operaciones.
- d. En qué manera, (si las hubiera), causa un daño físico
- e. Que debe hacerse para reparar la falla.³⁰

5. *¿De qué modo afecta cada falla?*

La metodología RCM reconoce que las consecuencias de las fallas son mucho más importantes que sus características técnicas, en realidad reconoce que la única razón de hacer cualquier tipo de mantenimiento proactivo no es para evitar las fallas en sí, sino evitar o al menos reducir las consecuencias que

²⁹ SAE JA1011—Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes.

³⁰ MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. Pág. 13, México: Aladon, 2004.

estas traen. El proceso de RCM clasifica estas consecuencias en los siguientes cuatro grupos:

- a. Consecuencias de fallas ocultas: Las fallas ocultas no causan un impacto directo, pero exponen a la empresa a fallas múltiples, con consecuencias serias y frecuentemente catastróficas. (La mayoría de estas fallas están asociadas con sistemas de protección no libres de fallas)
- b. Consecuencias medioambientales y de seguridad: Una falla trae consecuencias de seguridad si potencialmente puede dañar o causar la muerte. Tiene consecuencias medioambientales si provoca la violación de cualquier norma medioambiental corporativa, regional, nacional o internacional.
- c. Consecuencias operativas: Una falla trae consecuencias operativas cuando afecta la producción (rendimiento, calidad del producto, servicio al cliente o costos operativos, además del costo directo de reparación.)
- d. Consecuencias no operativas: Las fallas evidentes que conforman esta categoría, no tienen consecuencias ni de seguridad, ni de protección, de modo que solo implican el costo de reparación.³¹

6. *¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada falla?*

Cuando la falla se clasifica como falla menor, se puede realizar mantenimiento proactivo o rutinas de mantenimiento. Pero cuando la falla es significativa para la organización se debe aplicar un mantenimiento que prevenga o prediga las fallas del equipo en cuestión. En el caso en que un modo de falla evidente o un modo de falla oculta en el que la falla tenga consecuencias en la seguridad o el ambiente la tarea de mantenimiento aplicada debe reducir la probabilidad de falla a un nivel admisible para el usuario del activo; si por el contrario el impacto de la falla es en el área financiera, se debe procurar que los costos directos o indirectos asociados a la tarea de mantenimiento sean menores que los costos del modo de falla cuando se calculan en períodos de tiempo comparables. De

³¹ MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. Pág. 14, México: Aladon, 2004.

acuerdo al tipo de mantenimiento resultante del modo de falla que se presente, RCM plantea tres tipos de tareas:

- a. Tarea de restauración programada: restaurar o refabricar un componente sin tener en cuenta su vida útil programada.
- b. Tarea de descarte programado: descartar un ítem o pieza al momento o antes de su vida útil programada sin tener en cuenta su condición.
- c. Tareas en condición programada: Llevar el control de los parámetros de un ítem bajo la condición de que estén dentro de los rangos normales de funcionamiento, este es un método efectivo, pero a la vez costoso de detección de fallas antes de su ocurrencia. Para aplicar esta tarea debe haber un intervalo P-F (período para el desarrollo de falla) identificable y que el tiempo de ejecución de la tarea sea menor que el intervalo P-F probable más corto.

7. ¿Qué debe hacerse si no se encuentra el plan de acción apropiado?

Cuando no se encuentra con un plan de acción adecuada RCM dispone de tres propuestas para corregir o prevenir las fallas que se presenten en los bienes:

- a. Descubrimiento de fallas: Revisar las funciones del equipo para determinar si hubo falla.
- b. Rediseño: modificación del hardware y cambios en el procedimiento del equipo.
- c. Mantenimiento no programado: Se espera a que ocurra la falla en el equipo y se repara, también se le conoce como “acudir a la falla” (MOUBRAY, 2004.)

3.1.5. Ventajas y limitaciones del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad – RCM El RCM tiene numerosas ventajas en cuanto al aumento de la disponibilidad y confiabilidad de la maquinaria, las más importantes son:

- Crear un espíritu altamente crítico en todo el personal (operaciones o mantenimiento) frente a condiciones de falla y averías
- Logra importantes reducciones de costo de mantenimiento

- Optimiza la confiabilidad operacional, maximiza la disponibilidad y/o mejora la mantenibilidad de las plantas y sus activos
- Integra las tareas de mantenimiento con el contexto operacional
- Fomenta el trabajo en grupo, convirtiéndolo en algo rutinario
- Incrementa la seguridad operacional y la protección ambiental
- Optimiza la aplicación de las actividades de mantenimiento tomando en cuenta la criticidad e importancia de los activos dentro del contexto operacional.
- Establece un sistema eficiente de mantenimiento preventivo
- Aumenta el conocimiento del personal tanto de operaciones como de mantenimiento con respecto a los procesos operacionales y sus efectos sobre la integridad de las instalaciones.
- Involucra a todo el personal que tiene que ver con el mantenimiento en la organización (desde la alta gerencia hasta los trabajadores de planta)
- Facilita el proceso de normalización a través del establecimiento de procedimientos de trabajo y registro. ³²

Ilustración 10: Beneficios del mantenimiento centrado en confiabilidad

Calidad	Tipo de Servicio	Costo	Tiempo	Riesgo
<p>Aumenta la disponibilidad en al menos un 6%, por el sólo hecho de implementar.</p> <p>Elimina las fallas crónicas y elimina las causas raíces.</p> <p>Aumenta la flexibilidad operacional.</p> <p>La programación de mantenimiento se basa en hechos reales.</p> <p>Proporciona el completo conocimiento de las fallas reales y potenciales de las máquina, así como de sus causas.</p>	<p>Proporciona un mejor clima organizacional para el trabajo en equipo.</p> <p>Ayuda a entender mejor las necesidades y los requerimientos de los clientes.</p> <p>Disminuye las paradas imprevistas.</p> <p>Genera un ambiente de investigación y desarrollo alrededor de los análisis de fallas.</p>	<p>Reduce los niveles de mantenimiento al menos en un 40%.</p> <p>Optimiza los programa de mantenimiento.</p> <p>Reduce los costos planeados o no de mantenimiento al menos en un 40%.</p> <p>Alarga la vida de los equipos para propósitos especiales.</p> <p>Todas las actividades de mantenimiento se analizan en un contexto de costo / beneficio.</p>	<p>Mejora los tiempos medios de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad al menos en un 25%.</p> <p>Aumenta los tiempos de funcionalidad de los equipos al menos en un 150% en promedio.</p> <p>Reduce o elimina los tiempos de demora en suministros o búsqueda de recursos o repuestos.</p> <p>Jerarquiza las actividades de mantenimiento, logrando su reducción en el tiempo.</p>	<p>Brinda seguridad e integridad ambiental en todo el desarrollo del proceso, a niveles muy superiores de los que se tienen antes de implementario.</p> <p>Las fallas con consecuencias sobre el medio ambiente o la seguridad son las que más se atacan y eliminan.</p> <p>Reduce al mínimo la posibilidad de fallas en cadena o superpuestas.</p> <p>Su razón de calificación al riesgo la hace como una de las tácticas más seguras.</p>

Fuente: MORA, Alberto. Mantenimiento Industrial efectivo. Pág. 272

Por otro lado, las limitaciones del RCM radican principalmente en el factor humano con que cuenta la organización, ya que de este depende el éxito de la metodología. El equipo natural de trabajo juega un papel importante, debido a

³² MORA, Alberto. Mantenimiento Industrial efectivo. Pág. 272, Medellín: Coldi, 2008

que será este el único responsable de divulgar de manera correcta y eficiente esta filosofía de manera que las personas involucradas con el RCM no vean este cambio como un problema, sino como una solución a sus problemas. Es por esto que se debe tener gran cuidado al momento de seleccionar las personas que conformaran el equipo de trabajo natural.³³

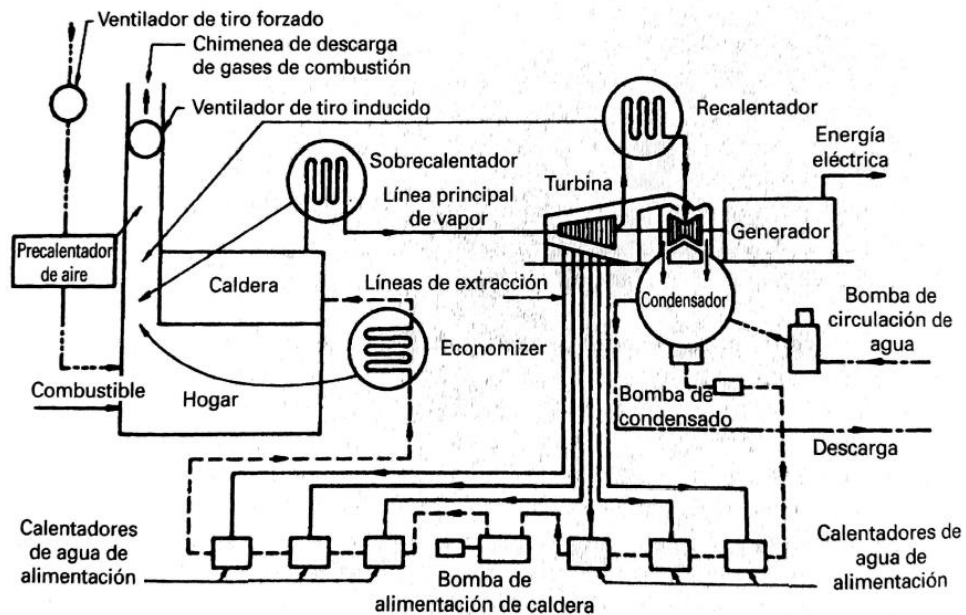
3.1.6. Sistema de aire y gases de caldera. Una caldera es un recipiente a presión cerrado en el que se calienta un fluido para uso externo del mismo por aplicación directa del calor resultante de la combustión de un combustible (sólido, líquido o gaseoso) o por utilización de la energía nuclear o eléctrica.³⁴ La mayor parte de las instalaciones de caldera usadas para generación de energía eléctrica son del tipo supercrítico o subcrítico. Los tres componentes más importantes son el generador de vapor (caldera), el grupo turbina-generador eléctrico y el condensador. El principal elemento que une las tres partes es el vapor producido por una caldera de alta presión. El vapor se desplaza sucesivamente desde la caldera a la turbina y de esta al condensador. El ciclo de agua de alimentación completa este circuito haciendo el flujo continuo del condensador hacia la caldera (Ilustración 11). Así, a la elevada temperatura final del ciclo, el generador de vapor transfiere o convierte energía calorífica del combustible a la energía térmica en forma de vapor de agua sobrecalentado. La turbina después transforma el calor del vapor en trabajo mecánico y acciona el generador eléctrico que está acoplado a ella. El generador a su vez transforma esta energía mecánica en energía eléctrica. Los sistemas de proceso de alta presión pueden utilizar caldera pirotubulares o acuotubulares, dependiendo de la presión o capacidad necesarias.³⁵

³³ MORA, Alberto. Mantenimiento Industrial efectivo. Pág. 273, Medellín: Coldi, 2008

³⁴ KOHAN, Anthony Lawrence. Manual de Caldera: Principios operativos de mantenimiento, construcción, instalación, reparación, seguridad, requerimientos y normativas. Pág. 15, España: McGraw-Hill 2000

³⁵ KOHAN, Anthony Lawrence. Manual de Caldera: Principios operativos de mantenimiento, construcción, instalación, reparación, seguridad, requerimientos y normativas. Pág. 27, España: McGraw-Hill 2000

Ilustración 11: Planta generadora de energía eléctrica con caldera de vapor de alta presión y turbogenerador de vapor conectado, condensador, calentadores de agua de alimentación y bomba de alimentación de agua de caldera



Fuente: KOHAN, Anthony Lawrence. Manual de Caldera: Principios operativos de mantenimiento, construcción, instalación, reparación, seguridad, requerimientos y normativas. Pág. 28.

Las calderas de la central Termoguajira son de alta presión, es decir que funcionan a una presión de trabajo de 20 Kg/cm² hasta presiones cercanas a la presión crítica (228 Kg/cm²).

Estas unidades son de cámara de combustión u hogar balanceado, utilizando ventiladores de tiro forzado (VTF), los cuales toman el aire de la atmósfera y lo entrega a través de conductos y precalentadores de aire a los quemadores con el fin de suministrar aire de combustión; y ventiladores de tiro inducido (VTI), que succionan los gases de la caldera producto de la combustión y los dirige a la chimenea para su descarga a la atmósfera. Estos ventiladores, junto con el sistema de ductos y otros ventiladores especiales son los que conforman el sistema de manejo de aire de las calderas.³⁶

El aire total que se introduce a la caldera, está compuesto así:

³⁶ DISTRAL S.A. Manual de entrenamiento Central Termoeléctrica de la Guajira. Pág. 16

- a. Aire secundario: Aire que se utiliza para la combustión y para dar la forma y dirección de la llama interna de la caldera. Para producir este aire se utilizan dos ventiladores de tiro forzado A y B que operan en paralelo (Ilustración 12). Aire de combustión principal suministrado a la caldera en forma de combustible, el aire del ambiente entra al sistema por los ventiladores de tiro forzado; desde ahí se lleva control del volumen y flujo del aire a partir de las compuertas de entrada del ventilador. Luego el aire pasa a través de unos ductos de salida hasta llegar al calentador de aire a vapor, donde se eleva la temperatura del aire para evitar la condensación del agua y así prevenir la corrosión interna de los calentadores. Luego el aire pasa a un calentador rotatorio en donde se utilizan los gases que salen del paso trasero de la caldera para calentar más el aire y mejorar la eficiencia del ciclo.³⁷ Los calentadores de aire se aplican a las calderas que queman combustibles sólidos y proporcionan aire caliente para evaporar algo de humedad del combustible sólido, lo cual ayuda a la combustión rápida y también para extraer calor de los gases de escape y así ahorrar energía o combustible.³⁸ Ya calentado el aire con los gases recuperados del ciclo de combustión, este pasa a las cajas de aire, el cual se comporta como un colector que distribuye el aire a los diferentes compartimentos (aire auxiliar, aire de combustión y aire de sobrefuego) con ayuda de las compuertas de salida correspondientes.³⁹

³⁷ DISTRAL S.A. Manual de entrenamiento Central Termoeléctrica de la Guajira. Pág. 16

³⁸ KOHAN, Anthony Lawrence. Manual de Caldera: Principios operativos de mantenimiento, construcción, instalación, reparación, seguridad, requerimientos y normativas. Pág. 497, España: McGraw-Hill 2000

³⁹ DISTRAL S.A. Manual de entrenamiento Central Termoeléctrica de la Guajira. Pág. 16

Ilustración 12: Ventilador de Tiro Forzado



Fuente: Captura tomada en las instalaciones de la Central Termoguajira

- b. Aire de pilotos: Se utiliza para la combustión y refrigeración del sistema de ignición. Se produce con un ventilador de aire de ignición A, quedando un ventilador B en reserva (Ilustración 13). Este aire se obtiene a partir de la succión del aire secundario frío que pasa por el ducto de salida de los ventiladores de tiro forzado. Esta succión se realiza con dos ventiladores de aire montados en paralelo, un dámper automático de transferencia para impedir la recirculación en ventiladores fuera de servicio y un dámper de control modular para mantener la presión diferencial requerida entre las cajas ignitoras y el hogar (sobre 80 mm de columna de agua)⁴⁰

⁴⁰ DISTRAL S.A. Manual de entrenamiento Central Termoeléctrica de la Guajira. Pág. 17

Ilustración 13: Ventilador de aire de ignición



Fuente: Captura tomada en las instalaciones de la Central Termoguajira

- c. Aire primario: Se utiliza para el transporte del carbón pulverizado e inicio de la combustión. Se genera con cuatro ventiladores A, B, C y D operando en paralelo, quedando un ventilador E en reserva (Ilustración 14). El aire primario se utiliza únicamente durante la quema de carbón y tiene tres funciones principales: secar el carbón en los molinos, transportar el carbón pulverizado a los quemadores en las cajas de aire del hogar y suministrar aire de sello al sistema de alimentadores de carbón y a través de dos ventiladores al sistema de molinos. El aire primario proviene de la atmosfera y es succionado por cuatro ventiladores que descargan en un circuito común. Una parte del aire frío pasa por un sector de los calentadores rotatorios donde se eleva la temperatura a partir de los gases recuperados del ciclo de combustión en caldera y a partir de ahí el aire primario caliente entra a los molinos, donde se mezcla con la parte de aire primario frío restante en proporciones controladas para obtener la temperatura correcta de la mezcla de aire carbón que debe salir del molino. Cada conducto de aire frío y caliente tiene dámetros de control para modular el volumen y temperatura de aire para cada molino. La cantidad de aire se mide con el

diferencial de presión producido en un “Venturi” existente en cada ducto de entrada a los molinos.⁴¹

Ilustración 14: Ventilador de aire primario



Fuente: Captura tomada en las instalaciones de la Central Termoguajira

- d. Aire de sello: Se genera con un ventilador de aire de sello A, quedando un ventilador B en reserva (Ilustración 15). Es utilizado solo cuando se quema carbón, se compone de dos ventiladores que succionan aire del ducto de aire primario frio y aumenta su presión para llevarlo a los equipos del sistema de carbón pulverizado donde se requiere este aire de sello. Ejemplo: sistema de lubricación de los cojinetes de los molinos.⁴²

⁴¹ DISTRAL S.A. Manual de entrenamiento Central Termoeléctrica de la Guajira. Pág. 17-18

⁴² DISTRAL S.A. Manual de entrenamiento Central Termoeléctrica de la Guajira. Pág. 18

Ilustración 15: Ventilador aire de sello



Fuente: Captura tomada en las instalaciones de la Central Termoguajira

- e. Gases: El aire de salida de caldera se define como gases, los cuales son producidos al quemar el combustible y estos son removidos del sistema mediante los dos ventiladores de tiro inducido A y B, los cuales los descargan “limpios” a la atmosfera por la chimenea (Ilustración 16). Para evacuar limpios a los gases, primero hay que remover la ceniza en las tolvas del economizador donde se separan las partículas pesadas de las livianas, luego los gases pasan por las tolvas del calentador donde son sometidos al mismo tratamiento y finalmente llegan a los precipitadores electrostáticos donde separan las partículas magnéticas. Su temperatura va bajando durante el recorrido que hace por los sobrecalentadores de vapor, los recalentadores de vapor, el economizador y los calentadores, esto debido a que va cediendo calor para todos los procesos de los sistemas mencionados.⁴³

⁴³ DISTRAL S.A. Manual de entrenamiento Central Termoeléctrica de la Guajira. Pág. 18

Ilustración 16: Ventilador de tiro inducido



Fuente: Captura tomada en las instalaciones de la Central Termoguajira

- f. Aire de enfriamiento fotoceldas y T.V.: Existen dos ventiladores que toman el aire del ducto de descarga del aire de ignitores para refrigerar los detectores de llama (Ilustración 17). Cuando los ventiladores de aire de pilotos están fuera de servicio, el aire de enfriamiento se toma automáticamente de la atmósfera. ⁴⁴

⁴⁴ DISTRAL S.A. Manual de entrenamiento Central Termoeléctrica de la Guajira. Pág. 17

Ilustración 17: Ventilador cámara de TV y fotocelda



Fuente: Captura tomada en las instalaciones de la Central Termoguajira

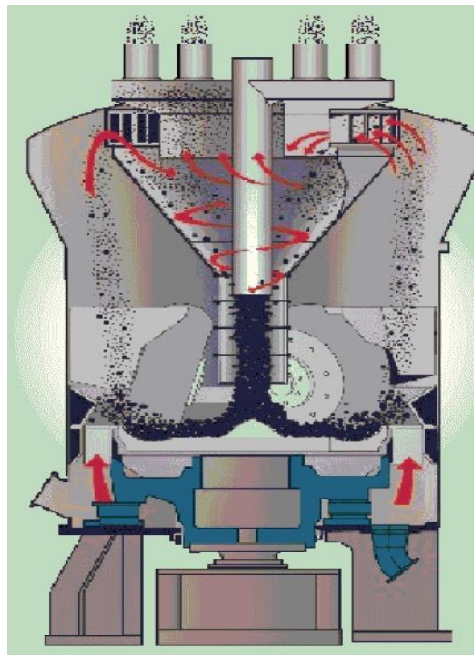
El caudal total de aire a la caldera es controlado por los ventiladores de tiro forzado en proporción a la cantidad total de combustible quemado. Cuanto mayor sea la cantidad de combustible quemado más aire será necesario. Se proporciona el aire secundario total a los niveles por medio de los dámperes del aire de combustible (aire secundario cuando entra a un compartimiento de combustible en servicio) y del aire auxiliar (aire secundario que entra al hogar por los compartimientos de aire) de la caja de aire. La distribución del aire depende del número de niveles en servicio y de la cantidad de combustible de cada nivel. El punto de ignición del combustible es una buena indicación de que se tiene la cantidad adecuada de aire secundario. ⁴⁵

Cuando se utiliza combustible sólido, en el caso de la central Termoguajira se usa carbón, el control de la calidad de carbón que se introduce al hogar de la caldera es regulado en los alimentadores de carbón. La descarga de los alimentadores es directamente sobre los molinos o pulverizadores de carbón donde se introduce el aire primario en proporción con la velocidad del alimentador (Ilustración 18). El aire primario seca y transporta el carbón pulverizado, el aire primario caliente entra a la base del molino por el conducto

⁴⁵ DISTRAL S.A. Manual de entrenamiento Central Termoeléctrica de la Guajira. Pág. 23

de aire primario debajo del tazón y levanta las partículas de carbón de tal forma que estas pasen por los clasificadores del molino para así controlar la finura del carbón, las partículas más pequeñas que se mantienen en la mezcla de aire y carbón pasan por el Venturi de salida y entra a los cuatro tubos de descarga conectados a la parte superior del molino las cuales llegan a las cuatro cajas de aire individuales ubicadas en las esquinas del hogar donde entregan la mezcla de carbón pulverizado y aire primario a presión positiva a las toberas tangenciales inclinables ubicadas en cada caja de aire. El aire primario, el carbón pulverizado y el aire secundario se mezclan en el compartimiento del carbón para su combustión dentro del hogar. ⁴⁶

Ilustración 18: Pulverizador de carbón



Fuente: <http://www.power-eng.com/articles/print/volume-111/issue-5/departments/field-notes/pulverizer-performance-upgrades-lower-fuel-costs.html>

⁴⁶ DISTRAL S.A. Manual de entrenamiento Central Termoeléctrica de la Guajira. Pág. 37-38

4. ANÁLISIS DE CRITICIDAD A SISTEMA DE AIRE Y GASES

El análisis de criticidad es una de las metodologías que permiten establecer la jerarquía o prioridades de procesos, sistemas y equipos, creando una estructura que facilita la toma de decisiones acertadas y efectivas, direccionando esfuerzos y los recursos en áreas donde sea más importante y/o necesario mejorar la confiabilidad operacional, basado en la realidad actual.

Desde el punto de vista matemático la criticidad se define como:

$$\text{Criticidad} = \text{frecuencia} \times \text{consecuencia}$$

En la ecuación anterior, la frecuencia está asociada al número de eventos o fallas que presenta el sistema o proceso evaluado y, la consecuencia está referida con: el impacto y flexibilidad operacional, los costos de reparación y los impactos en seguridad y ambiente. En función de lo antes expuesto se establecen como criterios fundamentales para realizar un análisis de criticidad los siguientes:

- Seguridad
- Medio ambiente
- Producción
- Costos de mantenimiento
- Tiempo promedio para reparar

Para la selección del método de evaluación se tienen en cuenta criterios de ingeniería, factores de ponderación y cuantificación. Para la aplicación de un procedimiento definido se trata del cumplimiento de la guía de aplicaciones que se haya diseñado. Por último, la lista jerarquizada es el producto que se obtiene del análisis.

Emprender un análisis de criticidad tiene su máxima aplicabilidad cuando se han identificado al menos una de las siguientes:

- Fijar prioridad en sistemas complejos
- Administrar recursos escasos
- Crear valor
- Determinar impacto en el negocio
- Aplicar metodologías de confiabilidad operacional

El análisis de criticidad aplica en cualquier conjunto de procesos, plantas, sistemas, equipos y/o componentes que requieran ser jerarquizados en función de su impacto en el proceso o negocio de donde forman parte. Sus áreas comunes de aplicación se orientan a establecer programas de implantación y prioridades en los siguientes campos:

- Mantenimiento
- Inspección
- Materiales
- Disponibilidad de planta
- Personal

En el ámbito de mantenimiento al tener plenamente establecido cuales sistemas son más críticos, se podrá establecer de una manera más eficiente la prioridad de los programas y planes de mantenimiento de tipo: predictivo, preventivo y correctivo e inclusive posibles rediseños y modificaciones menores a nivel de los sistemas o subconjuntos; inclusive permitirá establecer la prioridad para la programación y ejecución de órdenes de trabajo.

En el ámbito de inspección el estudio de criticidad facilita y centraliza la implantación de un programa de inspección, dado que la lista jerarquizada indica donde vale la pena realizar inspecciones y ayuda en los criterios de selección de los intervalos y tipo de inspección requerida para sistemas de protección y control (presión, temperatura, nivel, velocidad, espesores, flujos, etc.) así como para equipos dinámicos, estáticos y estructurales.

En el ámbito de materiales, la criticidad de los sistemas ayuda a tomar decisiones más acertadas sobre el nivel de equipos y piezas de repuestos que deben existir en el almacén central, así como los requerimientos de partes, materiales y herramientas que deben estar disponibles en los almacenes de planta, es decir, podemos sincerar el stock de materiales y repuestos de cada sistema y/o equipo logrando un costo óptimo de inventario.

En el ámbito de disponibilidad de planta los datos de criticidad permiten una orientación certera en la ejecución de proyectos, dado que es el mejor punto de partida para realizar estudios de inversión de capital y renovaciones en los procesos, sistemas o equipos de una instalación, basados en el área de mayor impacto total, que será aquella con el mayor nivel de criticidad.

A nivel del personal un buen estudio de criticidad permite potenciar el adiestramiento y desarrollo de habilidades en el personal, dado que se puede diseñar un plan de formación técnica, artesanal y de crecimiento personal, basado en las necesidades reales de la instalación, tomando en cuenta primero las áreas más críticas que es donde se concentran las mejores oportunidades iniciales de mejora y agregar el máximo valor.

Los valores de criticidad obtenidos serán ordenados de mayor a menor, y serán graficado utilizando diagramas de barra, lo cual permitirá de forma fácil visualizar la distribución descendente de los sistemas evaluados.

La distribución de barras en la mayoría de los casos, permitir establecer fácil tres zonas específicas: alta criticidad, mediana criticidad y baja criticidad. Esta información es la que permite orientar la toma de decisiones, focalizando los esfuerzos en la zona de alta criticidad, donde se ubica la mejor oportunidad de agregar valor y aumentar la rentabilidad del negocio.⁴⁷

⁴⁷ TOVAR GUTIERREZ, Guillermo. Análisis de criticidad y formulación de un plan de mantenimiento rutinario para los molinos de bolas. Universidad Simón Bolívar. Decanato de Estudios de Postgrado. Especialización en Diseño y Mantenimiento Industrial. Barranquilla, 2007. Pág. 18 – 20.

El flujograma que se debe realizar para evaluar la criticidad es el siguiente:

Ilustración 19: Flujograma para evaluación de criticidad



Fuente: González, Sánchez y Ospina. Pág. 99

La definición de cada criterio es:

- Frecuencia de falla: veces en que falla cualquier componente del sistema
- Nivel de uso de equipo: veces en las que se usa el equipo por año o por mes.
- Impacto operacional: porcentaje de producción que se afecta cuando ocurre la falla.
- Flexibilidad Operacional: facilidad que se tiene para reparar o reemplazar el equipo sin generar costos o pérdidas.

- Tiempo promedio para reparar: tiempo para reparar o reemplazar el equipo.
- Costo de reparación de la falla: costo de la reparación del equipo, sin incluir las pérdidas generadas por la falla del equipo. En caso de no conocerse, utilizar el 30% del costo del equipo para realizar la evaluación.
- Impacto en HSE – IHSE: posibilidad de ocurrencia de eventos no deseados con daños a personas y medio ambiente.⁴⁸

4.1. APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CRITICIDAD

Inicialmente se realizará un análisis de criticidad para los equipos que componen el sistema de aire y gases de la Caldera con el fin de establecer la jerarquía y prioridad de cada equipo en el proceso y así crear una estructura que facilite la toma de decisiones en relación a las inversiones costo/beneficio, direccionamiento de esfuerzo y mano de obra. A partir de los resultados arrojados del análisis se seleccionará el equipo que mayor impacto genera en la operación y generación, de manera que se realice un estudio a partir de la filosofía RCM para mejorar la confiabilidad operacional y disponibilidad del equipo crítico, basándose en la realidad actual.

El sistema de aire y gases de caldera está conformado por los siguientes equipos:

Tabla 1: Sistema de aire y gases de calderas Termoguajira

MACROSISTEMA	SISTEMA	EQUIPO
Caldera	Sistema de aire y gases	Ventilador de Tiro forzado
Caldera	Sistema de aire y gases	Ventilador de Tiro inducido
Caldera	Sistema de aire y gases	Ventilador de Aire primario
Caldera	Sistema de aire y gases	Ventilador de Aire de sello

⁴⁸ GONZALEZ ROBLES, William. SANCHEZ QUINTERO, Rudin. OSPINA GARCIA, Pablo. Diseño de una estrategia de Mantenimiento RCM para el sistema de control electrónico de un motocompresor INGERSOLL RAND 12SVG. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Mecánica. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga. 2005. Pág. 100 – 103.

Para realizar el análisis de criticidad del sistema de aire y gases, a partir del CMMS MainSaver, software de mantenimiento de la Central Termoguajira, se recopiló el historial de número de fallas, tipo de fallas, tiempo de reparación, y costos de mantenimiento debido a las fallas. El periodo de muestra seleccionado es Enero 2010 – Marzo 2017. En la tabla 2 se muestra el resumen de la información.

Tabla 2: Historial de fallas para el periodo Enero 2010 - Marzo 2017 de equipos del sistema de aire y gases

Equipo	Nº Fallas	Costo Total	Tiempo para reparar (TPR)	Tiempo promedio para reparar (TPPR)
VT0004				
ventilador tiro inducido A u1	37	\$ 109.921.479,81	410	11,1
Ventilador Tiro Inducido B u1	35	\$ 8.293.443,42	291	8,3
Total VT0004	72	\$ 118.214.923,23	701	9,7
VT0006				
Ventilador Tiro forzado A u1	48	\$ 89.489.825,04	481	10,0
Ventilador Tiro forzado B u1	51	\$ 129.987.691,63	1119	21,9
Total VT0006	99	\$ 219.477.516,67	1600	16,2
VT0029				
ventilador aire primario A u1	35	\$ 92.182.740,38	425	12,1
ventilador aire primario B u1	41	\$ 29.846.212,45	506	12,3
ventilador aire primario C u1	29	\$ 14.197.421,84	326	11,2
ventilador aire primario D u1	35	\$ 18.561.887,92	439	12,5
ventilador aire primario E u1	42	\$ 19.195.728,06	533	12,7
Total VT0029	182	\$ 173.983.990,65	2229	12,2
VT0034				
Ventilador aire de sello a molinos A u1	11	\$ 5.001.975,49	80	7,3
Ventilador aire de sello a molinos B u1	6	\$ 1.986.136,00	53	8,8
Total VT0034	17	\$ 6.988.111,49	133	7,8
Total general	370	\$ 518.664.542,04	4663	46

En la tabla 3 se exponen los criterios de evaluación para la elaboración del análisis. Con los valores determinados desde el numeral 1 al 7, calcular el valor de criticidad asociado al equipo a partir de la siguiente ecuación:

$$Nivel\ de\ criticidad = FF \times \left(NU \times \frac{\left[\frac{IO \times FO}{2,5} \times 60\% + \frac{IHSE}{0,5} \times 40\% \right]}{0,5} \times 80\% + \frac{CM \times TR}{0,25} \times 20\% \right)$$

Tabla 3: Criterios para evaluación de criticidad

ITEM	CRITERIOS	PUNTAJE
1	Frecuencia de Falla (FF)	
	Menor o igual a 1 Falla al año	1
	Entre 1 a 3 Fallas al año	3
	Mayor a 3 Fallas al año	5
2	Nivel de Uso (NU)	
	Menor a 30 Días/Año o 1 Día/ Mes	1
	Entre 30 a 120 Días/Año o 1 a 10 Días/Mes	3
	Mayor a 120 Días/Año o 10 Días/Mes	5
3	Impacto Operacional (IO)	
	Parada total del equipo	5
	Afecta significativamente el desarrollo del proceso	3
	No genera ningún efecto significativo	1
4	Flexibilidad (IF)	
	No existe equipo o repuesto de reemplazo	5
	Equipo o repuesto compartido con otro proceso	3
	Existe equipo o repuesto de reemplazo	1
5	Tiempo de reparación o reposición (TR)	
	Menor o igual a 10 días	1
	Entre 10 a 30 días	3
	Mayor a 30 días	5
6	Costo de mantenimiento (CM)	
	Menos de 2 SMMLV	1
	Entre 2 y 20 SMMLV	3
	Más de 20 SMMLV	5
7	Impacto HSE (IHSE)	
	Criticidad HSE Alta	5
	Criticidad HSE Media	3
	Criticidad HSE Baja o No crítico	1

Fuente: González, Sánchez y Ospina. Pág. 100 – 103.

4.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CRITICIDAD

En la tabla 4 se muestran los valores y porcentajes de criticidad para determinar el nivel de criticidad del equipo:

Tabla 4: Parámetros de nivel de criticidad

Nivel de Criticidad	Valores y Porcentajes de Criticidad			
	Mínimo	Máximo	% MIN	% MAX
General	0	150	0	30
Esencial	151	350	30	70
Crítico	351	500	70	100

Fuente: González, Sánchez y Ospina. Pág. 103.

A continuación, se presenta la tabla de análisis de criticidad para el sistema de aire y gases de las calderas de la Central Termoguajira:

Tabla 5: Resultados Análisis de Criticidad Sistema Aire y Gases

EQUIPO	FRECUENCIA (FF)	NIVEL DE USO (NU)	IMPACTO OPERACIONAL (IO)	FLEXIBILIDAD (FO)	TIEMPO PARA REPARAR (TR)	COSTOS DE MTTT (CM)	IMPACTO HSE (IHSE)	RIESGO TOTAL	CRITERIO
Ventilador Tiro Forzado	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	3,0	5,0	460,0	Crítico
Ventilador Tiro Inducido	5,0	5,0	5,0	5,0	3,0	1,0	3,0	348,0	Esencial
Ventilador Aire Primario	5,0	5,0	3,0	3,0	3,0	1,0	3,0	194,4	Esencial
Ventilador Aire de Sello	3,0	5,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	27,4	General

Como se puede observar el Ventilador de Tiro Forzado es el equipo con mayor nivel de criticidad del sistema de aire y gases, a partir de estos resultados, se elaborará una tabla en la que se asignara la metodología de mantenimiento requerido para cada equipo que compone el sistema de aire y gases, dependiendo de la criticidad resultante de la evaluación.

Tabla 6: Metodología de Mantenimiento para los equipos del Sistema Aire y Gases de Caldera

ITEM	EQUIPO	CRITICIDAD	METODOLOGÍA DE MANTENIMIENTO	JUSTIFICACIÓN
1	Ventilador de tiro forzado	Crítico	Mantenimiento Centrado en Confiabilidad - RCM	El RCM se apoya en la metodología AMEF (Análisis de Modos y Efectos de Fallas) para determinar el nivel de criticidad de fallas. Se aplica esta metodología de mantenimiento para mantener funciones con la seguridad requerida, seguridad inherente y niveles de confiabilidad; optimizar la disponibilidad y obtener información para mejorar el diseño.
2	Ventilador de tiro inducido	Esencial	Mantenimiento Predictivo	El Mantenimiento Predictivo es una forma avanzada de mantenimiento preventivo, aquí se realizan acciones de mantenimiento planificado y programado que se realizan en función de las condiciones de operación del equipo, fundamentadas en: Análisis técnico, instrumentos especializados y técnicas estadísticas y programa de inspección y reparación de equipo que se adelanta al suceso de fallas. El objetivo de aplicar esta metodología de mantenimiento es detectar fallas potenciales a través de un programa flexible para detectar el estado técnico del sistema y la indicación de realiza o no alguna acción correctiva. La ventaja de este mantenimiento es menos paradas de máquina, mayor calidad y eficiencia de máquinas instaladas, seguridad y protección del medio ambiente y reducción de tiempo de mantenimiento. A este ventilador se le realizará un tipo de mantenimiento más profundo debido a que su impacto operacional es alto y un daño de este equipo puede afectar grandemente la generación de energía, es por esto que se debe tener un control constante de las condiciones del equipo.
3	Ventilador de aire primario	General	Mantenimiento Preventivo	El mantenimiento preventivo es una metodología en el que se ejecutan operaciones sobre un equipo o sistema con el objeto de prevenirla ocurrencia de la falla. Con este tipo de mantenimiento se esperan ciclos de vida más largos, disminución de las fallas aleatorias, aumento de eficiencia y capacidad de procesos, alta disponibilidad de plantas, larga vida de los equipos, aumento en la seguridad operacional y bajos costos por impacto total. El objetivo de este mantenimiento es lograr la efectividad del sistema asegurando disponibilidad de objetos de mantenimiento mediante confiabilidad y mantenibilidad. Se aplica el mantenimiento preventivo a estos equipos debido a que la frecuencia de falla de estos equipos es baja, los costos de mantenimiento son bajos y el impacto operacional es bajo ya que
4	Ventilador de aire de sello	General	Mantenimiento Preventivo	cuenta con equipos en reserva con las mismas características técnicas para que en caso de que uno de ellos se dañe, pueda entrar el equipo en reserva sin afectar la generación de energía.

5. CONTEXTO OPERACIONAL

Los ventiladores son las maquinas más usadas para producir el movimiento del aire en la industria. Su funcionamiento se basa en la entrega de energía mecánica al aire a través de un rotor que gira a alta velocidad y que incrementa la energía cinética del fluido, que luego se transforma parcialmente en presión estática. Se divide en dos grandes grupos: los ventiladores axiales y los ventiladores centrífugos. ⁴⁹

Los ventiladores se dividen en varias clases y formas dependiendo del uso, el tipo de impulsor, la disposición de los cojinetes, el tipo de succión, la dirección de succión, la dirección de salida y con o sin controlador de volumen.

La parte principal de un ventilador consiste en una carcasa, un cono de succión, el impulsor, el eje, el cojinete y la base. ⁵⁰

Los ventiladores de tiro forzado proveen aire de combustión a las calderas. La entrada del ventilador de tiro forzado está abierta a la atmosfera y descarga el aire el cual pasa a través de bobinas de precalentamiento, luego por el calentador de aire hasta la caja de viento de caldera y finalmente a través de los quemadores.

En las calderas de carbón pulverizado, aproximadamente un tercio del aire de combustión es de aire primario, el cual es usado para transportar el carbón pulverizado a los quemadores. Algunas calderas usan ventiladores de aire primario, los cuales succión aire de la atmosfera y operan paralelamente con los ventiladores de tiro forzado o succionan directamente de la descarga del ventilador de tiro forzado y operan en serie con el ventilador.

⁴⁹

https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwibx9WW0cXTAhXCOiYKHZ0CD7gQFggyMAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.sistemamid.com%2Fdownload.php%3Fa%3D5410&usg=AFQjCNEJekmW5tifmFiD9np_irF3mAE18w&sig2=hPakJ72afsgYI9_KbkgW0Q

⁵⁰ MHI, Mitsubishi Ltda. Manual de Instrucciones, Corporación Eléctrica de la costa Atlántica, Central Termoeléctrica del Cerrejón Unidad I, Equipos de Combustión Vol. M-3 ½. 1891.

Para unidades presurizadas sin ventiladores de tiro inducido, el ventilador de tiro forzado es dimensionado para la totalidad del sistema de control de polución.

Los ventiladores de tiro forzado para plantas de quemado de carbón se clasifican detrás de los ventiladores de tiro inducido como causante de las salidas de planta. Las causas de falla de los ventiladores de tiro forzado son similares a las del ventilador de tiro inducido. Los ventiladores de tiro forzado en este tipo de plantas consumen aproximadamente el 0,7% de la energía bruta de salida.

Los márgenes de diseño del ventilador de tiro forzado son más pequeños que los del ventilador de tiro inducido, pero aun así más grandes que la de otros equipos.

Los sistemas de tiro balanceados utilizan ambos sistemas de ventilador de tiro forzado e inducido para mover el aire a través de la caldera.

Los ventiladores de tiro forzado en una caldera de tiro balanceado deben tener el volumen de salida de aire requerido, necesario para la combustión; además de pérdidas de aire caliente y presión de descarga lo suficientemente altas para igualar la resistencia total de los ductos de aire, calentadores, quemadores y cualquier otra resistencia entre la descarga del ventilador y la caldera.

El tiro dado por los ventiladores está determinado por las pérdidas de los siguientes componentes de la caldera:

- El hogar de caldera
- Caldera y sobrecalentador
- Economizador
- Calentador
- Precipitador electrostático
- Ductos
- Sistema de desulfuración de gas de combustión

- Chimenea⁵¹

Los ventiladores de tiro forzado de la Central Termoguajira son de tipo centrífugo, en estos ventiladores el aire ingresa en dirección paralela al eje del rotor, por la succión, y la descarga se realiza tangencialmente al rotor, es decir que el aire cambia de dirección noventa grados (90°). Este tipo de ventiladores desarrolla presiones mucho mayores que los ventiladores axiales, alcanzando presiones de hasta 1500 mmAq y son los empleados, mayormente, en los sistemas de ventilación localizada.⁵²

El ventilador de tiro forzado consta en esencia de un motor de accionamiento, generalmente eléctrico, con los dispositivos de control propios de los mismos: arranque, regulación de velocidad, conmutación de polaridad, etc., y un propulsor giratorio en contacto con el aire, al que le transmite energía (Ver ilustración 20).⁵³ Este propulsor adopta la forma de un rotor que posee una serie de paletas o álabes, de diversas formas y curvaturas, que giran aproximadamente entre 200 y 5000 rpm dentro de una caja o envoltura en forma de espiral.⁵⁴

⁵¹ EPRI. Forced Draft and Induced Draft Fan Maintenance Guide. Pág. 3 – 5, 2006

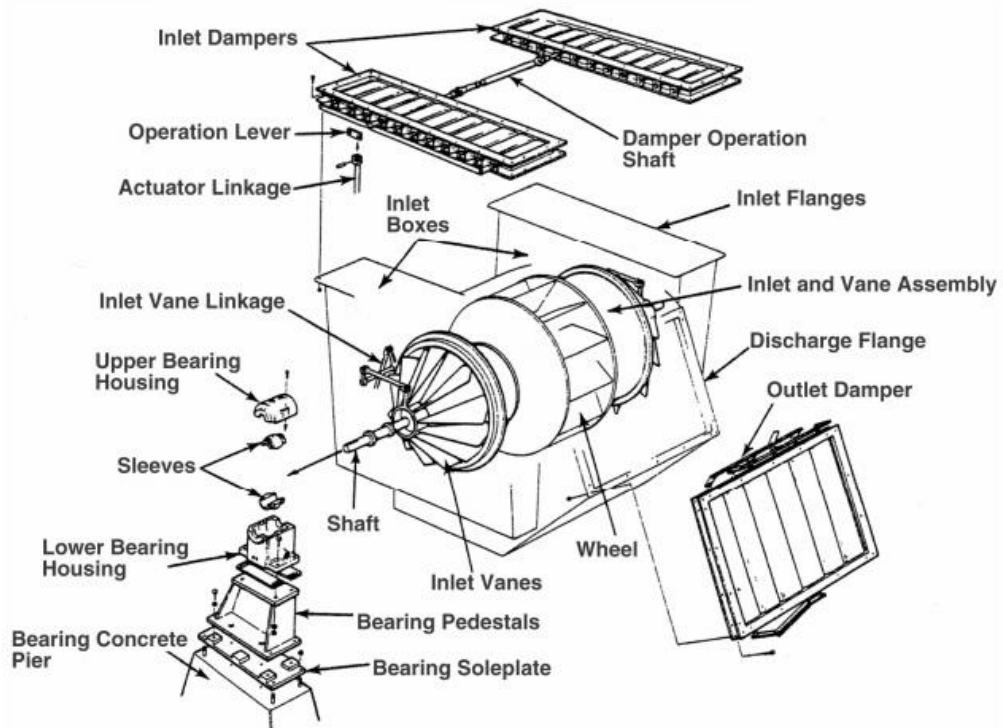
⁵² E Salvador Escoda S.A. Manual Práctico de Ventilación, Catalogo Técnico, edición 2. Pág. 5

⁵³ E Salvador Escoda S.A. Manual Práctico de Ventilación, Catalogo Técnico, edición 2. Pág. 5

⁵⁴

https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwibx9WW0cXTAhXCOiYKHZ0CD7gQFggyMAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.sistemamid.com%2Fdownload.php%3Fa%3D5410&usg=AFQjCNEJekmW5tiffmFiD9np_irF3mAE18w&sig2=hPakJ72afsgYI9_KbkgW0Q

Ilustración 20: Partes del Ventilador de Tiro Forzado



Fuente: EPRI. Forced Draft and Induced Draft Fan Maintenance Guide. Pág.10

Los ventiladores centrífugos con impulsor AIRFOIL son más usados para los ventiladores de tiro forzado debido a su alta eficiencia, bajo sonido, funcionamiento estable y su pronunciada curva de presión ascendente. Estas características aseguran una buena operación, particularmente cuando los ventiladores operan en paralelo.⁵⁵

5.1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE VENTILADOR DE TIRO FORZADO

Las características técnicas descritas por Mitsubishi para los Ventiladores de Tiro Forzado de las calderas de la Central Termoguajira para soportar una carga de 151 MW de energía bruta son las listadas en la tabla 7:

⁵⁵ EPRI. Forced Draft and Induced Draft Fan Maintenance Guide. Pág. 10, 2006

Tabla 7: Características Técnicas Ventilador Tiro forzado

CONDICIONES DE DISEÑO		
1	Volumen	6600 m ³ /min
2	Succión	-50 mmAq
3	Descarga	+415 mmAq
4	Presión diferencial	465 mmAq
5	Velocidad de ventilador	890 rpm
6	Eficiencia estática	0,8
7	Potencia en el eje	628 BKW a 38° C
8	Primera velocidad crítica	1160 rpm
9	Nivel de ruido después de cubierto	85 dB(A)
10	Motor eléctrico	6600 V - 60 Hz - 3 fases
11	Funcionamiento	Continuo
CONEXIÓN Y TAMAÑO		
1	Brida de succión	3150 x 900 x 2
2	Brida de descarga	3120 x 1800
3	Drenajes	50 ^a
MATERIALES		
1	Impulsor	SS41
2	Cojinete	FC25.WJZ
3	Acople	S55C
CONDICIONES AMBIENTALES		
1	Temperatura ambiente	Mín.: 20°C Máx.: 40°C
2	Humedad relativa	0,9
3	Atmosfera	760 mmHg
4	Altitud	5 mt
CARACTERÍSTICAS DE CONSTRUCCIÓN		
1	Tipo de impulsor	Airfoil
2	Diámetro	2050 mm
3	Velocidad máxima impulsor	95,5 m/s
REGISTRO DE CONTROL DE ENTRADA		
1	Par de compuerta	Entrada: 120 Kg-m Salida: 170 Kg-m
2	Tipo de cojinete	Manguito metálico
3	Método de lubricación	Anillo de aceite
4	Agua de refrigeración	35°C
5	Tipo de sello de eje	Empaque de fieltro
6	Tipo de acople	Acople de engranaje

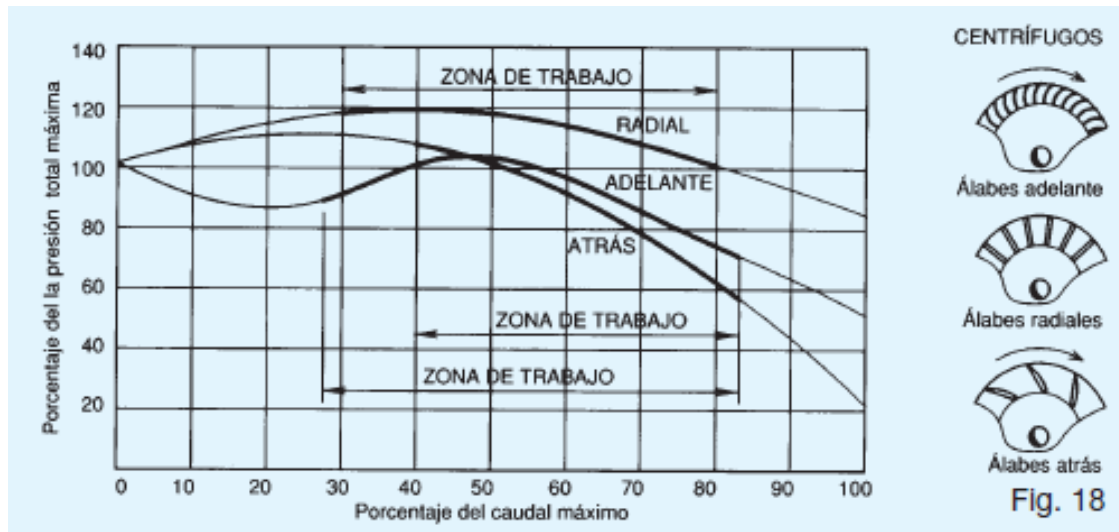
Fuente: MHI, Mitsubishi Ltda. Manual de Instrucciones, Corporación Eléctrica de la costa Atlántica, Central Termoeléctrica del Cerrejón Unidad I, Equipos de Combustión Vol. M-3 ½. 1891.

5.2. FUNCIONAMIENTO

Según sea el ventilador, tipo o tamaño, existe una zona de su curva característica en la que es recomendable su uso. Fuera de ella pueden producirse fenómenos que hacen aumentar desproporcionadamente el consumo hundiendo el rendimiento, provocando un aumento intolerable del ruido e incluso produciendo flujos intermitentes de aire en sentido inverso.

Para el caso de los ventiladores de tiro forzado de la central Termoguajira, la curva característica de funcionamiento se describe en la Ilustración 21:

Ilustración 21: Curva característica de funcionamiento de ventiladores de tiro forzado



Fuente: E Salvador Escoda S.A. Manual Práctico de Ventilación, Catalogo Técnico, edición 2. Pág. 8

En instalaciones importantes de ventilación, cuando es necesario disponer de caudales o presiones con grandes variaciones, puede resultar conveniente de dotarlas de aparatos acoplados de forma que trabajando en conjunto o bien separados proporcionen la prestación exigida en cada momento. Si las variaciones necesarias son discretas puede bastar un único aparato con un

sistema de regulación, pero cuando sean precisas unas prestaciones doble o triple o más de la simple, hay que recurrir a un sistema de acoplamiento.⁵⁶

Para la instalación de los ventiladores de tiro forzado se realizó un acoplamiento en paralelo, es decir que los ventiladores aspiran del mismo lugar y descargan hacia el mismo sentido en la canalización, uniendo allí sus caudales.⁵⁷

En este tipo de ventiladores se presenta el problema de tener que variar las prestaciones de un ventilador acoplado a una instalación porque se ha de adaptar a diferentes regímenes de funcionamiento. La regulación de las prestaciones de los ventiladores pretende dar respuesta a este problema, y puede plantearse desde la perspectiva de tener que aumentarlas como para disminuirlas.

La regulación por disminución se efectúa principalmente mediante los siguientes sistemas:

- Compuertas
- Regulación por By-Pass
- Regulación de Velocidad
- Variación Angulo de Alabes

La selección del sistema dependerá de diferentes criterios tales como la zona de regulación, ahorro energético, coste de la inversión, ruido, entre otros. La tabla 8 da una orientación sobre las zonas de regulación y, dentro de estas, las que son posibles y las recomendadas para cada uno de los sistemas mencionados.

⁵⁶ E Salvador Escoda S.A. Manual Práctico de Ventilación, Catalogo Técnico, edición 2. Pág. 13

⁵⁷ E Salvador Escoda S.A. Manual Práctico de Ventilación, Catalogo Técnico, edición 2. Pág. 15

Tabla 8: Sistemas de Regulación de Ventiladores

VENTILADOR	SISTEMA DE REGULACIÓN	ZONA DE REGULACION POSIBLE		ZONA DE REGULACION RECOMENDADA	
		de	a %	de	a %
CENTRIFUGO Y HELICOIDAL	COMPUERTA	100	70	100	90
	BY-PAS	100	0	100	80
	REG. VELOCIDAD	100	20	100	20
HELICOIDAL	ANGULO ALABES	100	0	100	0

Fuente: E Salvador Escoda S.A. Manual Práctico de Ventilación, Catalogo Técnico, edición 2. Pág. 17

En el caso de los ventiladores de tiro forzado, el sistema instalado es el de compuertas. En este sistema el ventilador comunica energía al aire que lo hace circular a través del ventilador-compuerta; a pesar de que el uso de las compuertas no presenta características óptimas, se utilizan en estos ventiladores por las bajas correcciones del caudal.

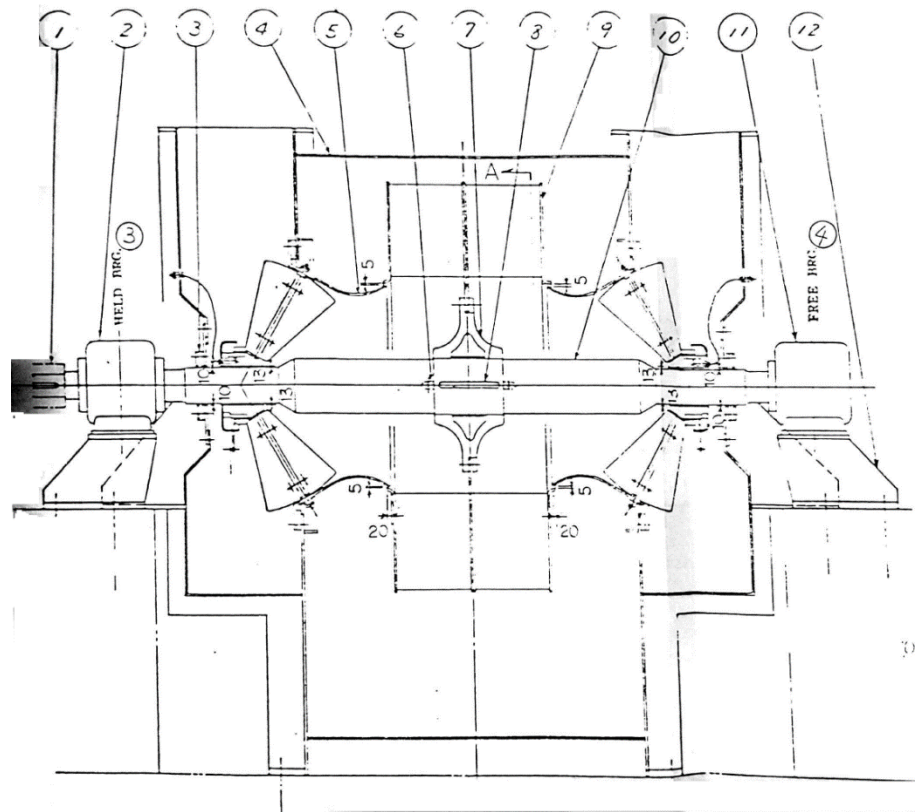
El control del caudal mediante compuertas a la entrada es preferible al control efectuado mediante compuertas instaladas a la salida ya que desde el punto de vista energético el control a la entrada es más eficiente.⁵⁸

5.3. COMPONENTES DEL VENTILADOR DE TIRO FORZADO

En la siguiente figura se ilustran los componentes del Ventilador de Tiro Forzado instalado en la Central Termoguajira:

⁵⁸ E Salvador Escoda S.A. Manual Práctico de Ventilación, Catalogo Técnico, edición 2. Pág. 17 - 20

Ilustración 22: Plano de Ventilador de Tiro Forzado



Fuente: MHI, Mitsubishi Ltda. Manual de Instrucciones, Corporación Eléctrica de la costa Atlántica, Central Termoeléctrica del Cerrejón Unidad I, Equipos de Combustión Vol. M-3 ½. 1891.

Tabla 9: Partes del Ventilador de Tiro Forzado

ITEM	PARTE DE VENTILADOR
1	Acople
2	Cojinete lado acople
3	Empaque
4	Carcasa
5	Cubierta del álabe
6	Cuña
7	Cubo del impulsor
8	Cuña
9	Impulsor
10	Eje
11	Cojinete lado libre
12	Base

5.3.1. Impulsor. El impulsor crea un torbellino que fluye al interior del ventilador, esto ocasiona un cambio en el ángulo de ataque entre el flujo y las aspas del ventilador. El impulsor tiene un costo inicial bajo, es un método de control simple y es muy común para ventiladores de tiro forzado. La mayor desventaja del impulsor es su pobre eficiencia para cargas bajas. El impulsor está sujeto a la erosión si la concentración de ceniza es alta. La articulación de las paletas y los cojinetes pueden atorarse o dañarse si están ubicados en la corriente de gas. Es por eso que estos componentes deben estar ubicados por fuera de la carcasa del ventilador, donde las inspecciones y mantenimientos pueden ser realizados sin necesidad de intervenir el ventilador. Los ductos de conexión a la entrada o salida del ventilador deben ser flexibles para aislar al ventilador de las vibraciones.

El impulsor usa parte de la pérdida de presión para acelerar el gas entrante en la dirección de la rotación de la voluta.

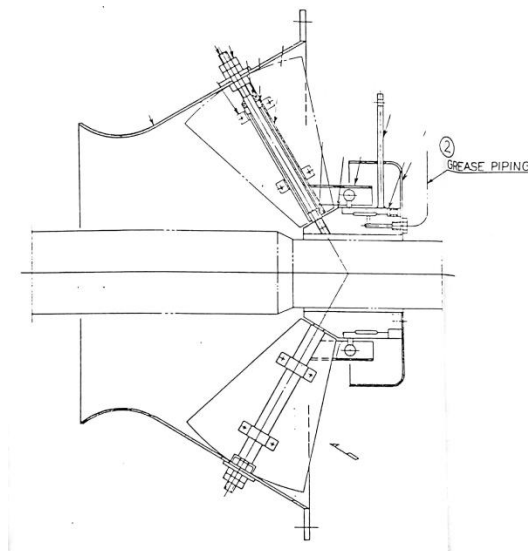
Para optimizar el funcionamiento del sistema, el operador debe realizar lo siguiente:

- Operar con las compuertas totalmente abiertas con el fin de limitar la pérdida de presión (la posición de las hélices debe ajustarse según los requisitos de carga).
- Estar atentos a los problemas mecánicos o de instrumentación que pueden causar vibración en las hélices.
- Ajustar manualmente el control del impulsor durante el arranque para evitar pérdidas de presión.
- Asegurar que las compuertas de salida están completamente cerradas para proveer un sellado de aire/gas antes del arranque, esto limita la inercia de la aceleración en el motor.⁵⁹

⁵⁹ EPRI. Forced Draft and Induced Draft Fan Maintenance Guide. Pág. 16 – 17, 2006

5.3.2. Compuertas de entrada. Las compuertas de entrada controlan el flujo de aire, ingresando un torbellino en el flujo y la caída de presión. Las compuertas de entrada tienen un costo inicial bajo, son simples, y no son tan propensos a la oxidación como los impulsores. El lazo de control de las compuertas de entrada es más sencillo que el del impulsor y puede ubicarse sin inconvenientes en la parte externa del ducto. Sin embargo, las pulsaciones del sistema de presión son más comunes con las compuertas de entrada que con los impulsores. Las compuertas pueden crear vórtices en las cajas de entrada o alrededor del eje del ventilador. La mayor desventaja de las compuertas de entrada es su baja eficiencia a cargas bajas.⁶⁰

Ilustración 23: Plano de álabes de compuerta de entrada



Fuentes: MHI, Mitsubishi Ltda. Manual de Instrucciones, Corporación Eléctrica de la costa Atlántica, Central Termoeléctrica del Cerrejón Unidad I, Equipos de Combustión Vol. M-3 ½. 1891

⁶⁰ EPRI. Forced Draft and Induced Draft Fan Maintenance Guide. Pág. 17, 2006

5.3.3. Unidad de fluido. La Unidad de fluido es un método de variación de la velocidad del ventilador para el control de flujo. La unidad de flujo está ubicada entre el motor y el ventilador para controlar la velocidad del ventilador. Normalmente, las compuertas de entrada son usadas en conjunto con la unidad de flujo para incrementar la velocidad de respuesta para evitar las variaciones de presión en el hogar de caldera durante transiciones. El uso de las compuertas como sistema de control durante la operación es una actividad normal pero que puede ser eliminado en la mayoría de las instalaciones. Usando los controles de velocidad con las compuertas completamente abiertas pueden resultar en un ahorro de energía significativo (200 HP para un ventilador de 6000 HP) con solo modificaciones menores.

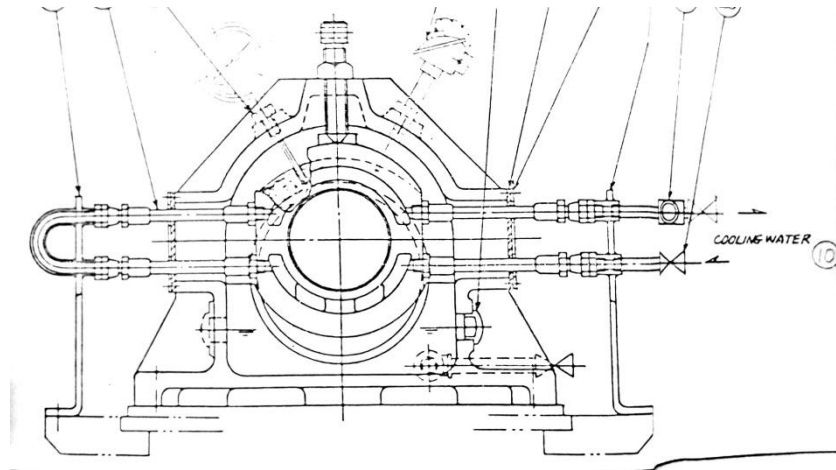
El control de velocidad permite al ventilador operar cerca de los picos de eficiencias en todo el rango de carga. Sin embargo, la unidad de fluido tiene una eficiencia máxima de aproximadamente 95%, y decrece con velocidades más bajas. La mayor desventaja de la unidad de fluido es el alto costo inicial, el cual es aproximadamente el mismo que el costo del ventilador.

Para optimizar el funcionamiento del sistema con unidad de fluido, el operador debe seguir los siguientes procedimientos:

- Encender el motor bajo una condición de cero carga (asegurarse que el acople de fluido está vacío y la compuerta está cerrada). Esto limitara la inercia de aceleración de la carga en el motor al acelerar la inercia del ventilador en su velocidad de operación a un rango controlable.
- Verificar que todas las compuertas estén completamente abiertas antes de su arranque para prevenir perdidas de presión.
- No usar compuertas como dispositivo de control de flujo para acelerar el volumen de salida del ventilador en un sistema que fue adaptado con una unidad de flujo. Esto causará perdidas en energía. El sistema de control debe estar sintonizado para permitir un dispositivo variador de velocidad con el fin de tener control con las compuertas en la posición totalmente abierta para un rango de flujo dado.

- Buscar problemas mecánicos o de instrumentación que puedan causar que el sistema recorra de un punto a otro.⁶¹

Ilustración 24: Unidad de fluido



Fuente: MHI, Mitsubishi Ltda. Manual de Instrucciones, Corporación Eléctrica de la costa Atlántica, Central Termoeléctrica del Cerrejón Unidad I, Equipos de Combustión Vol. M-3 ½. 1891.

5.3.4. Motor de velocidad variable. Los motores de velocidad variable están conectados directamente con el ventilador. La velocidad del motor es variable continuamente desde el 10% por encima de la velocidad máxima, aproximadamente. Motores sincronizados o inducidos pueden ser usados con dispositivos de frecuencia variable, y la frecuencia de la potencia del motor es controlado por un sistema electrónico.

El control de velocidad es el método óptimo de control de ventiladores centrífugos. La resistencia del sistema para uso de tiro inducido, y más para uso de ventiladores de tiro forzado, es una curva cuadrática. Este se debe a que la eficiencia del ventilador es típicamente constante sobre curvas cuadráticas de cabeza de flujo, un ventilador de velocidad variable puede operar cerca a su mejor eficiencia teórica en un total de rango de carga. Además, el control es estable bajo flujo cero. Ventiladores con motores de velocidad variable no requieren un engranaje de giro ya que el motor principal

⁶¹ EPRI. Forced Draft and Induced Draft Fan Maintenance Guide. Pág. 18, 2006

puede operar a la velocidad de los engranajes de giro por largos periodos de tiempo.⁶²

5.3.5. Cojinete Los dos tipos de cojinetes que generalmente se usan para ventiladores de tiro forzado son los cojinetes de rodamiento o los cojinetes de contacto deslizante. Ambos tipos, dependiendo de su aplicación, pueden ser diseñados para soportar cargas axiales o radiales.

El ventilador centrífugo puede usar tanto cojinete de bola o de rodillo, sin embargo, este tipo de cojinetes es más común en ventiladores axiales y los cojinetes de contacto deslizante en los ventiladores centrífugos. Los cojinetes de bola tienen cuatro componentes principales:

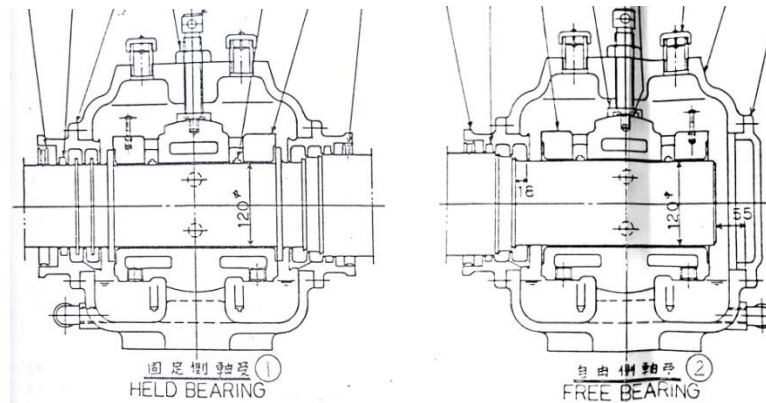
- Carrera externa
- Carrera interna
- Elemento rodante
- Espacio para el elemento rodante

Los cojinetes de tipo deslizante están compuestos de cuatro partes: muñón, manga superior e inferior y collar de empuje y anillo de lubricación. El cojinete de deslizamiento puede ser categorizado como de tipo fijo o flotante. Los cojinetes fijos pueden tener uno o dos collares de empuje. Los de tipo flotante son usados para permitir el crecimiento térmico en los ventiladores centrales y son instalados en el extremo opuesto del motor del ventilador.⁶³

⁶² EPRI. Forced Draft and Induced Draft Fan Maintenance Guide. Pág. 19, 2006

⁶³ EPRI. Forced Draft and Induced Draft Fan Maintenance Guide. Pág. 2, 2006

Ilustración 25: Cojinete lado acople y lado libre



Fuente: MHI, Mitsubishi Ltda. Manual de Instrucciones, Corporación Eléctrica de la costa Atlántica, Central Termoeléctrica del Cerrejón Unidad I, Equipos de Combustión Vol. M-3 ½. 1891.

5.3.6. Sistema de lubricación Se usan varias técnicas de lubricación para dar lubricante al ventilador y cojinetes del motor. La lubricación estática, en la cual cada cojinete tiene un suministro fijo de lubricante en su sumidero, es una práctica común. Este método es simple y positivo con respecto al costo – beneficio; sin embargo, recae en el operador la vigilancia e inspección de este sistema para detectar los niveles y calidad del lubricante. El uso de sensores de temperatura para dar alarmas de advertencia a la sala de control de operación, en caso de sobrecalentamiento de cojinete, es una ventaja de protección de este método.

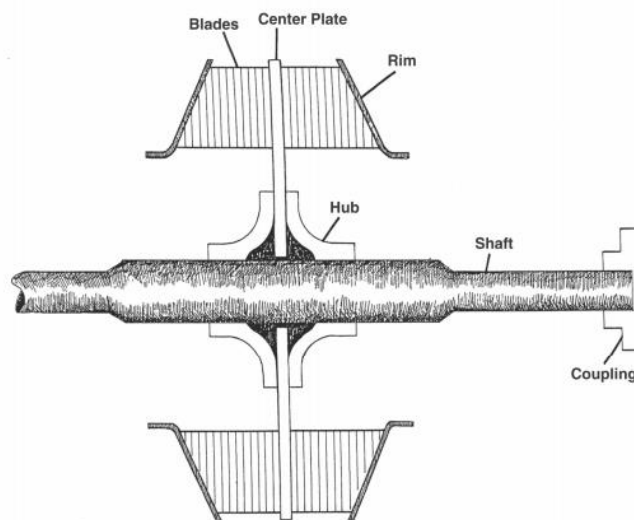
Este sistema tiene dos variaciones, una involucra el uso un sistema de lubricación forzado en el cual el lubricante es suministrado al cojinete bajo presión. La segunda opción consiste en el uso de un sistema de circulación, el cual suministra el lubricante al sumidero del cojinete; el anillo de lubricación mueve el lubricante hacia la superficie del cojinete. Esta última opción es la más utilizada.⁶⁴

⁶⁴ EPRI. Forced Draft and Induced Draft Fan Maintenance Guide. Pág. 23, 2006

5.3.7. Chumacera. La chumacera es un alojamiento de hierro colado de alto grado o acero prensado que da soporte a los cojinetes esféricos del ventilador y que contiene el aceite para la lubricación de los mismos.

5.3.8. Eje. El eje es el componente que se acopla al motor y permite la rotación del impulsor. Se sostiene en ambos extremos por el diámetro exterior al diámetro interior de los cojinetes.

Ilustración 26: Eje de ventilador



Fuente: EPRI. Forced Draft and Induced Draft Fan Maintenance Guide. Pág. 6

5.4. ESTADÍSTICA DE FALLA

Los datos de falla presentados fueron suministrados en base a información obtenida en encuestas de ventiladores de tiro forzado enviadas a empresas industriales. Los problemas más comunes de los ventiladores centrífugos ocurren en los alabes, cojinetes y la fundación, los cuales suman por encima del 50% de todos los problemas, otros componentes con fallas comunes son las compuertas, eje, motor e instrumentos de control. Las causas raíces más comunes son la corrosión y la vibración. Los problemas en cojinetes son

causados tanto por los problemas de diseño o mal mantenimiento u operación del equipo.⁶⁵

5.4.1. Estadísticas de fallas características de Ventiladores centrífugos.

De acuerdo al reporte CS-1693 de EPRI (Electric Power Research Institute) titulado “Failure Cause Analysis – Fans” se documentan los resultados de la encuesta realizada en 1981 sobre las causas de las fallas de los ventiladores en las plantas. En la tabla 10 se observa los resultados obtenidos:⁶⁶

Tabla 10: Porcentaje de fallas estadísticas de los componentes de Ventilador

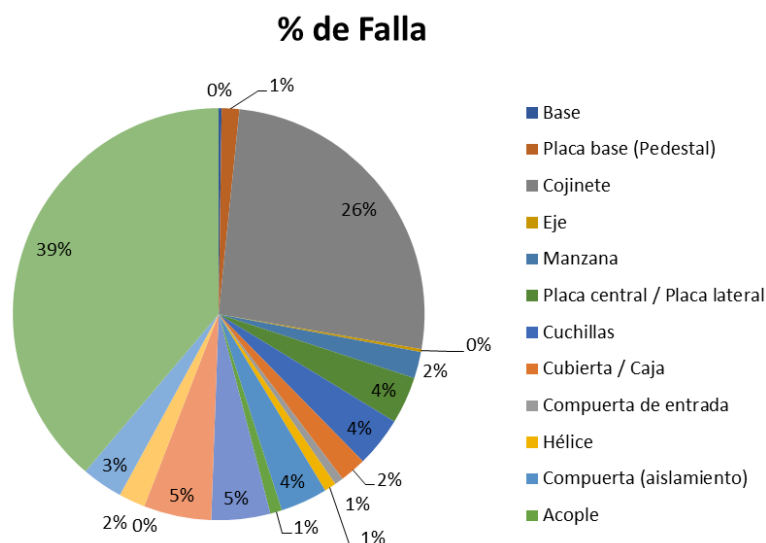
Componente	% de Falla	Componente	% de Falla
Base	0,1	Hélice	0,4
Placa base (Pedestal)	0,6	Dámperes (aislamiento)	1,6
Cojinete	11,3	Acople	0,4
Eje	0,1	Variador de velocidad	2,0
Manzana	0,9	Motor / Turbina	2,3
Placa central / Placa lateral	1,6	Engranaje de giro	0,0
Cuchillas	1,7	Controles	0,9
Cubierta / Caja	0,9	Ductos	1,4
Dámperes de entrada	0,3	Otros	16,8

Fuente: EPRI. Forced Draft and Induced Draft Fan Maintenance Guide. Pág. 44

⁶⁵ EPRI. Forced Draft and Induced Draft Fan Maintenance Guide. Pág. 43, 2006

⁶⁶ EPRI. Forced Draft and Induced Draft Fan Maintenance Guide. Pág. 43, 2006

Ilustración 27: Gráfica Porcentaje de fallas estadísticas de los componentes de Ventilador



5.5. LEVANTAMIENTO DE INFORMACION HISTORICA DE FALLAS

Para el análisis de la ocurrencia de fallas y componentes críticos del ventilador de Tiro Forzado de la Central Termoguajira, se extrajo una muestra de la base de datos del sistema de información de mantenimiento, Mainsaver. Se tuvo en cuenta el registro histórico de trabajos de mantenimiento realizados a estos ventiladores para el periodo Enero 2010 – Diciembre 2016.

El sistema de aire y gases de Termoguajira cuenta con 4 ventiladores de tiro forzado, dos por cada unidad de generación. Para este análisis se tomó como muestra la información de dos de los ventiladores de tiro forzado.

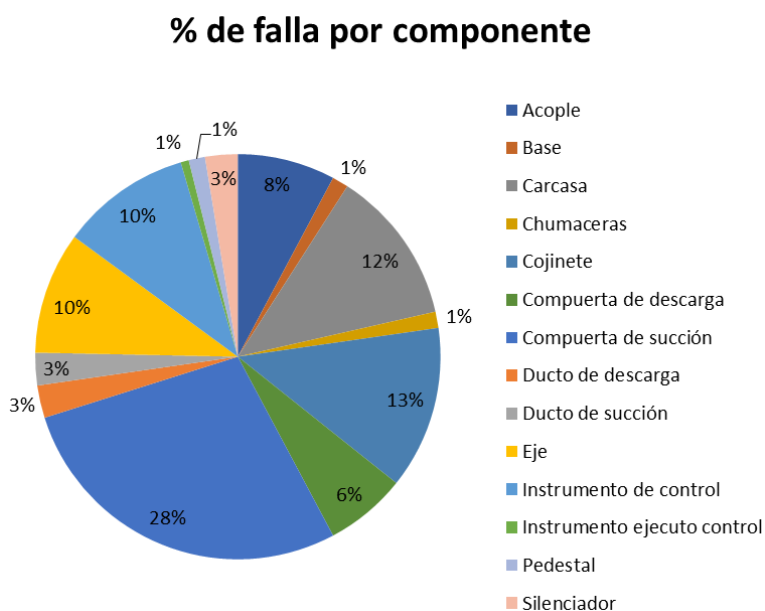
5.5.1. Frecuencia de falla por componentes Ventiladores de Tiro Forzado.

Según los datos extraídos del software de información de mantenimiento, Mainsaver, los resultados de frecuencia de falla por componente según el registro histórico de la muestra seleccionada son los siguientes (Ver detalles en Anexo A):

Tabla 11: Porcentaje de falla por componente en Ventilador de Tiro forzado

Componente	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	N° Total de fallas	% de falla por componente
Acople		2	2	2	3	1	2	12	7,8%
Base		1	1					2	1,3%
Carcasa		3	5	2	5	3	1	19	12,3%
Chumaceras						1	1	2	1,3%
Cojinete	1	2	4	2	4	2	5	20	13,0%
Compuerta de descarga	2	2				4	2	10	6,5%
Compuerta de succión	2	8	4	6	7	12	4	43	27,9%
Ducto de descarga	4							4	2,6%
Ducto de succión						3	1	4	2,6%
Eje		3	2	2	2	1	5	15	9,7%
Instrumento de control	1		4	3	4	4		16	10,4%
Instrumento ejecuto control					1			1	0,6%
Pedestal							2	2	1,3%
Silenciador					4			4	2,6%
N° Total de fallas	10	21	22	17	30	31	23	154	100%

Ilustración 28: Gráfico Porcentaje de falla por componente en Ventilador de Tiro forzado



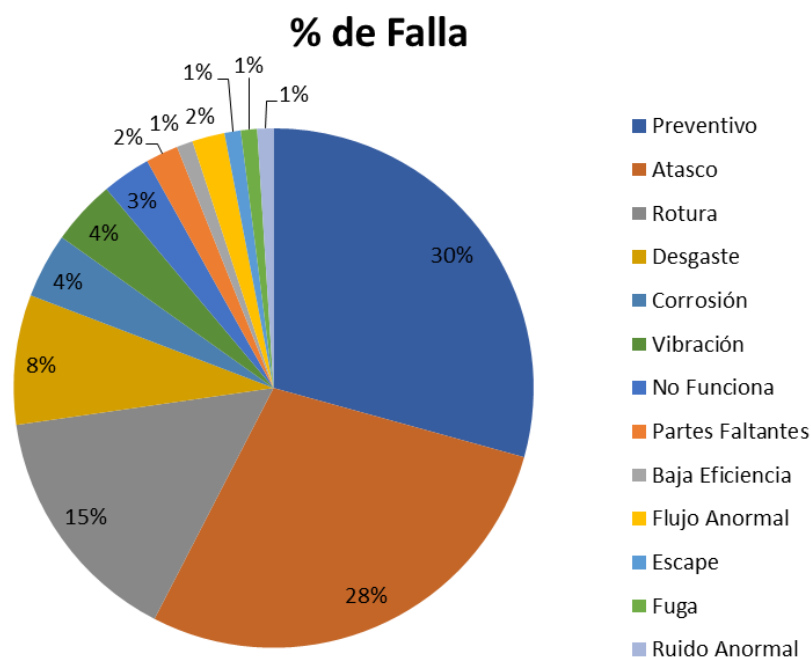
De lo anterior se puede observar que los componentes con mayor ocurrencia de fallas son los cojinetes, compuerta de succión y carcasa.

5.5.2. Fallas del Ventilador de Tiro Forzado. Según los datos extraídos del software de información de mantenimiento, Mainsaver, los resultados de las fallas habituales según el registro histórico de la muestra seleccionada son los siguientes (Ver detalles en Anexo A):

Tabla 12: Porcentaje de Falla en Ventilador de Tiro Forzado

Falla	N° Fallas	% de Falla	Falla	N° Fallas	% de Falla
Preventivo	29	31,9%	Partes Faltantes	2	2,2%
Atasco	28	30,8%	Baja Eficiencia	1	1,1%
Rotura	15	16,5%	Flujo Anormal	2	2,2%
Desgaste	8	8,8%	Escape	1	1,1%
Corrosión	4	4,4%	Fuga	1	1,1%
Vibración	4	4,4%	Ruido Anormal	1	1,1%
No Funciona	3	3,3%			

Ilustración 29: Gráfica de Porcentaje de Falla de Ventiladores de Tiro Forzado



De los resultados anteriores se puede observar que la falla más ocurrente es el mantenimiento preventivo, atasco y rotura.

6. ANALISIS DE CRITICIDAD VENTILADOR DE TIRO FORZADO

Como se mencionó en el numeral 4, el análisis de criticidad es una metodología que se utiliza para establecer de manera cuantitativa el nivel de importancia de un activo en una compañía, con el fin de enfocar los recursos económicos y humanos a los equipos que más pueden impactar en la operación, finanzas, seguridad y ambiente.⁶⁷

Basándose en los criterios para la evaluación de criticidad descritos en el numeral 4 (ver tabla 3), se ejecuta un nuevo análisis de criticidad aplicado al ventilador de tiro forzado con el fin determinar los componentes más críticos de este equipo. En la tabla 13 se presenta el análisis de criticidad realizado a los elementos que componen el ventilador de tiro forzado:

En la tabla 4 se muestran los valores y porcentajes de criticidad para determinar el nivel de criticidad del equipo:

⁶⁷ GONZALEZ ROBLES, William. SANCHEZ QUINTERO, Rudin. OSPINA GARCIA, Pablo. Diseño de una estrategia de Mantenimiento RCM para el sistema de control electrónico de un motocompresor INGERSOLL RAND 12SVG. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Mecánica. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga. 2005. Pág. 100

Tabla 13: Resultados análisis de criticidad de componentes ventilador tiro forzado

COMPONENTE	FRECUENCIA (FF)	NIVEL DE USO (NU)	IMPACTO OPERACIONAL (IO)	FLEXIBILIDAD (FO)	TIEMPO PARA REPARAR (TR)	COSTOS DE MTTO (CM)	IMPACTO HSE (IHSE)	RIESGO TOTAL	CRITERIO
Acople	3,0	5,0	5,0	1,0	1,0	3,0	1,0	55,2	General
Base	1,0	5,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	9,1	General
Carcasa	3,0	5,0	1,0	1,0	1,0	3,0	1,0	32,2	General
Chumaceras	1,0	5,0	3,0	1,0	1,0	1,0	1,0	13,0	General
Cojinete	5,0	5,0	5,0	3,0	1,0	3,0	1,0	188,0	Esencial
Compuerta de descarga	3,0	5,0	3,0	1,0	1,0	1,0	1,0	38,9	General
Compuerta de succión	5,0	5,0	3,0	1,0	1,0	3,0	1,0	72,8	General
Ducto de descarga	1,0	5,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	9,1	General
Ducto de succión	1,0	5,0	1,0	1,0	1,0	3,0	1,0	10,7	General
Eje	3,0	5,0	5,0	5,0	3,0	5,0	1,0	199,2	Esencial
Instrumento de control	3,0	5,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	27,4	General
Pedestal	1,0	5,0	3,0	1,0	1,0	1,0	1,0	13,0	General
Silenciador	1,0	5,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	9,1	General

Como se puede observar, los componentes que mayor criticidad tienen en los ventiladores de tiro forzado son los cojinetes y el eje.

7. ANÁLISIS DE MODOS DE FALLAS Y EFECTOS DE FALLAS POTENCIALES (AMFE)

El análisis de modos y efectos de fallas potenciales, AMFE, es un proceso sistemático para la identificación de las fallas potenciales del diseño de un producto o de un proceso antes de que estas ocurran, con el propósito de eliminarlas o de minimizar el riesgo asociado a las mismas. Por lo tanto, el AMFE puede ser considerado como un método analítico estandarizado para detectar y eliminar problemas de forma sistemática y total, cuyos objetivos principales son:

- Reconocer y evaluar los modos de fallas potenciales y las causas asociadas con el diseño y manufactura de un producto
- Determinar los efectos de las fallas potenciales en el desempeño del sistema
- Identificar las acciones que podrán eliminar o reducir la oportunidad de que ocurra la falla potencial
- Analizar la confiabilidad del sistema.

Aunque el método del AMFE generalmente ha sido utilizado por las industrias automotrices, este es aplicable para la detección y bloqueo de las causas de fallas potenciales en productos y procesos de cualquier clase de empresa, ya sea que estos se encuentren en operación o en fase de proyecto; así como también es aplicable para sistemas administrativos y de servicio.

Requerimientos del AMFE:

- Un equipo de personas con el compromiso de mejorar la capacidad de diseño para satisfacer las necesidades del cliente
- Diagramas esquemáticos y de bloque de cada nivel del sistema, desde subconjuntos hasta el sistema completo.
- Especificaciones de los componentes, lista de piezas y datos del diseño.
- Especificaciones funcionales de módulos, subconjunto, etc.
- Requerimientos de manufacturas y detalles de los procesos que se van a utilizar

- Formas del AMFE (en papel o electrónicas) y una lista de consideraciones especiales que se apliquen al producto.

7.1. BENEFICIOS DEL AMFE

La eliminación de los modos de fallas potenciales tiene beneficios tanto a corto como a largo plazo. A corto plazo, representa ahorros de los costos de reparaciones, las pruebas repetitivas y el tiempo de paro. El beneficio a largo plazo es mucho más difícil medir puesto que se relaciona con la satisfacción del cliente con el producto y con su percepción de la calidad; esta percepción afecta las futuras compras de los productos y es decisiva para crear una buena imagen de los mismos.

Por otro lado, el AMFE apoya y refuerza el proceso de diseño ya que ayuda en la selección de alternativas durante el diseño incrementa la probabilidad de que los modos de fallas potenciales y sus efectos sobre la operación del sistema sean considerados durante el diseño proporciona una información adicional para ayudar en la planeación de programas de pruebas concienzudos y eficientes.

Desarrolla una lista de modos de fallas potenciales, clasificados conforme a su probable efecto sobre el cliente. Proporciona un formato documentado abierto para recomendar acciones que reduzcan el riesgo para hacer el seguimiento de ellas; detecta fallas en donde son necesarias características de auto corrección o de leve protección; identifica los modos de fallas conocidos y potenciales que de otra manera podrían pasar desapercibidos; detecta fallas primarias, pero a menudo mínimas, que pueden causar ciertas fallas secundarias; proporciona un punto de vista fresco en la comprensión de las funciones de un sistema.

7.2. DEFINICIÓN DE FRONTERAS

Las fronteras del ventilador son:

- a. Acople
- b. Chumacera lado acople
- c. Eje

- d. Impulsor
- e. Chumacera lado libre
- f. Motor

Ilustración 30: Definición de fronteras



Fuente: Captura tomada en las instalaciones de la Central Termoguajira

7.3. IDENTIFICACIÓN DE FUNCIONES Y FALLAS

Una vez que el objetivo del análisis ha sido establecido, el siguiente paso en el proceso del AMFE es identificar funciones. Una función es el propósito para el cual fue diseñada o seleccionado un producto o proceso que está bajo análisis. Si se trata de un sistema, las funciones deben ser también identificadas. Los modos de fallas potenciales o las categorías de fallas pueden ser entonces identificados describiendo la forma en la cual el producto o proceso falla. Los modos de falla caen en una de cinco categorías posibles de falla:

- Falla total
- Falla parcial
- Falla intermitente
- Falla antes de tiempo
- Falla por sobre exigencia o sobre carga de la función

El propósito de agrupar los modos de falla en cinco grupos es para ayudar al equipo de trabajo a identificar todos los posibles modos de falla. Analizando los modos de se pueden revelar posibles modos de fallas inusuales que pudieran pasar desapercibidas en ciertas ocasiones. ⁶⁸

Según SAE JA 1012 se define función como “Lo que el usuario desea que realice un activo físico o sistema”. Los activos pueden tener funciones en dos tipos de categorías, las cuales son primarias y secundarias:

- Funciones primarias: Es la razón por la cual cualquier organización adquiere un activo o sistema.
- Funciones secundarias: se espera que el activo desarrolle otras funciones además de las primarias, estos son menos obvias que las primarias.

7.4. FALLA FUNCIONAL

Sucede cuando el activo opera por fuera de los parámetros de diseño u operación deseados por el usuario.

Según SAE JA 1012 la definición de modos de falla es “Un estado en que un activo físico o sistema ni se encuentra disponible para una función específica a un nivel de desempeño deseado”

RCM lo realiza en dos niveles:

- Primero identifica cuales son las circunstancias que origina la falla.
- Segundo, se debe preguntar que pueden causar que la falla en el activo.

7.5. MODO DE FALLA

Según SAE JA 1012 un modo de falla es “Un evento único, que causa una falla funcional”. También se puede describir de la siguiente manera es una causa posible que puede hacer que el activo se encuentre en estado de falla.

⁶⁸ TOVAR GUTIERREZ, Guillermo. Análisis de criticidad y formulación de un plan de mantenimiento rutinario para los molinos de bolas. Universidad Simón Bolívar. Decanato de Estudios de Postgrado. Especialización en Diseño y Mantenimiento Industrial. Barranquilla, 2007. Pág. 21 – 23.

Muchas de las fallas funcionales son debidas a aplicarle esfuerzos a los activos por encima de lo que son capaces de resistir. Estos errores se pueden categorizar en los siguientes ítems:

- Operación incorrecta
- Ensamblaje incorrecto
- Daño externo⁶⁹

7.6. EFECTOS DE FALLA

Luego de que las funciones y modos de falla han sido establecidos, el siguiente paso en el proceso de un AMFE es identificar las consecuencias potenciales cuando se presente un modo de falla. Esto se canaliza a través de una tormenta de ideas con el equipo de trabajo.⁷⁰

Según SAE JA 1012 “Es lo que ocurre cuando sucede un modo de falla”. Es lo que trae consigo cuando la ocurrencia de un modo de falla tal y como lo experimenta el cliente. En ella se debe describir en la medida de lo posible lo siguiente:

- Evidencia de que ha ocurrido la falla anteriormente
- Como afecta la seguridad y el medio ambiente
- Como afecta las operaciones o producción
- Evidencias de daños físicos que la falla ha causado anteriormente
- Que debe realizarse para corregir la falla.

⁶⁹ GONZALEZ ROBLES, William. SANCHEZ QUINTERO, Rudin. OSPINA GARCIA, Pablo. Diseño de una estrategia de Mantenimiento RCM para el sistema de control electrónico de un motocompresor INGERSOLL RAND 12SVG. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Mecánica. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga. 2005. Pág. 106 – 107.

⁷⁰ TOVAR GUTIERREZ, Guillermo. Análisis de criticidad y formulación de un plan de mantenimiento rutinario para los molinos de bolas. Universidad Simón Bolívar. Decanato de Estudios de Postgrado. Especialización en Diseño y Mantenimiento Industrial. Barranquilla, 2007. Pág. 23

7.7. CONSECUENCIAS

Según SAE JA 1012 las consecuencias de falla se define como “Efectos que puede provocar un modo de falla o una falla múltiple”. Las consecuencias se pueden categorizar de la siguiente manera:

- Consecuencia de fallas ocultas
- Consecuencias ambientales y para la seguridad
- Consecuencias operacionales
- Consecuencias no operacionales

7.8. RESULTADO DE FMEA DE ÍTEMS MANTENIBLES Y TAREAS DE MANTENIMIENTO PROPUESTAS

Para el desarrollo de la metodología RCM se responden las siguientes siete preguntas propuestas por SAE JA 1011:

- ¿Cuáles son las funciones del sistema y las normas asociadas?
- ¿Cómo puede fallar el sistema para cumplir estas funciones?
- ¿Qué causa una falla funcional?
- ¿Qué pasa cuando ocurre una falla?
- ¿Cuáles serían las consecuencias cuando ocurre la falla?
- ¿Qué se puede hacer para detectar y prevenir la falla?
- ¿Qué debería hacer cuando la tarea de mantenimiento proactiva no se puede establecer?⁷¹

⁷¹ GONZALEZ ROBLES, William. SANCHEZ QUINTERO, Rudin. OSPINA GARCIA, Pablo. Diseño de una estrategia de Mantenimiento RCM para el sistema de control electrónico de un motocompresor INGERSOLL RAND 12SVG. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Mecánica. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga. 2005. Pág. 107 – 108.

7.9. ANÁLISIS DE MODOS DE FALLAS Y EFECTOS DE FALLAS POTENCIALES (AMFE) DE VENTILADOR DE TIRO FORZADO

Cód. F	Función	Cód. FF	Falla Funcional	Cód. MF	Modo de Falla	Efecto de Falla
1	Suministrar un volumen no menor a 6600 m ³ /min de aire a temperatura ambiente a 890 RPM.	A	No suministra aire	1	Acople dentado partido	Se detiene por completo el equipo, se produce mucho calor, chispas y ruido y puede ocasionar graves daños al eje del ventilador.
				2	Eje partido	Esta falla tiene consecuencias catastróficas para el equipo, ya que puede ocasionar daños en los cojinetes y las chumaceras, en el impulsor y los conos de succión y el las compuertas de succión. A demás de tener un potencial de peligro para la seguridad de las personas. Hay una parada total del ventilador genera mucho ruido y calor.
		B	Suministro de aire menor a 6600 m ³ /min	1	Polvo adherido al impulsor	Ocasiona descaste del impulsor, desbalanceo del equipo, vibración en los cojinetes, alza en el amperaje del motor.
				2	Disminución de la velocidad	Puede ocasionar perdida de la película de aceite entre el eje y los cojinetes produciendo contacto entre estos, lo que lleva al desgaste de material antifricción, aumento en la vibración y la temperatura y hasta desgaste y daños en la superficie del eje.
				3	Anormalidad del impulsor	Disminución del funcionamiento (baja eficiencia).
				4	Escape de aire	Disminución del funcionamiento (baja eficiencia).

Cód. F	Función	Cód. FF	Falla Funcional	Cód. MF	Modo de Falla	Efecto de Falla
				5	Contacto del impulsor con el cono de succión	Esta falla lleva al desgaste y/o deformación del impulsor y los conos de succión, produce ruidos anormales, aumento en la temperatura, desbalanceo y altas vibraciones.
				6	Ducto de succión parcialmente bloqueado	Disminución del funcionamiento (baja eficiencia).
2	Suministrar aire con una temperatura de los cojinetes no mayor a 40°C más alta que la temperatura ambiente y una velocidad de vibración entre 2.5 y 6 mm/s.	A	Sobrecalentamiento del cojinete (temperatura arriba del límite permitido)	1	bajo nivel de aceite	EL equipo sigue en funcionamiento, con temperaturas por arriba de lo permitido puede producir desprendimiento del material antidesgaste del cojinete (babbit) y ocasionar desgaste al eje.
				2	Alto nivel de aceite	El alto nivel del lubricante genera más fricción, lo que aumenta la temperatura, esto puede causar desprendimiento del material antifricción del cojinete (babbit).
				3	deterioro del aceite	Un lubricante deteriorado pierde sus propiedades y aditivos, lo que puede permitir el contacto metal-metal, causando desgastes en el cojinete y el eje.
				4	Fuga en el sistema de enfriamiento	El ventilador sigue en servicio, produce oxidación del eje y del cojinete, hay un deterioro del aceite.
				5	anillo de lubricación partido	Deja de circular el aceite y no se lubrica el cojinete, lo que lleva a desgaste en el cojinete y en el eje.

Cód. F	Función	Cód. FF	Falla Funcional	Cód. MF	Modo de Falla	Efecto de Falla
				6	Cojinete desalineado	Estos cojinetes son tipo esféricos, sino se tiene un cuidado especial puede que no queden concéntricos con el eje, por lo que la holgura no queda bien distribuida, causando que el cojinete se desgaste irregularmente.
		B	Vibración excesiva del cojinete (arriba de 6 mm/s)	1	Cojinete fuera de medida	Los cojinetes deben estar entre 1,5 y 2 veces el diámetro nominal del eje/1000 para mantener los límites permitidos de vibraciones. Este modo de falla produce daño no solo al cojinete, sino también al acople y a las chumaceras.
				2	Soltura en los pernos de la chumacera	Causa rotura de los pernos, fisuras en la chumacera, desgaste del cojinete.
				3	Tornillo superior del cojinete suelto	Se produce desalineamiento del cojinete, desgaste del material antidesgaste (babbit) y del eje.
				4	Desalineamiento del motor	Se genera desgaste de los dientes del acople y/o rotura del mismo.
				5	Eje desgastado y/con mal acabado superficial	Hace que se desgaste aceleradamente el babbit del cojinete.
				6	Impulsor desbalanceado	El impulsor fuera de balance hace que se rompa la película de aceite causando desgaste en los cojinetes y el eje, puede ocasionar agrietamiento y/o rotura de las chumaceras y provocar fugas de agua de enfriamiento.

7.10. HOJA DE DECISIÓN RCM

La Hoja de decisión de RCM (Ilustración 31) permite asentar las respuestas a las preguntas formuladas en el Diagrama de decisión, y en función de esas respuestas, registrar:

- Qué mantenimiento de rutina (si lo hay) será realizado, con qué frecuencia será realizado y quién lo hará.
- Qué fallas son lo suficientemente serias como para justificar el rediseño.
- Casos en los que se toma una decisión deliberada de dejar que ocurran las fallas.

Ilustración 31: Modelo Hoja de Decisión RCM

HOJA DE DECISION RCM II		ELEMENTO										N°	Realizado por:	Fecha	Hoja
		COMPONENTE												Fecha	de
Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Tareas "a falta de"			Tareas Propuestas	Frecuencia inicial	
F	FF	MF	H	S	E	O			H4	H5	S4				

Los encabezamientos de las primeras diez columnas de la Hoja de Decisión se refieren a las preguntas del diagrama de decisión de RCM:

Las columnas tituladas H, S, E, O y N, son utilizadas para registrar las respuestas a preguntas concernientes a las consecuencias de cada modo de falla.

Las tres columnas siguientes, tituladas H1, H2, H3, etc., registran si ha sido seleccionada una tarea proactiva, y si es así, que tipo de tarea.

Si se hace necesario responder cualquiera de las preguntas “a falta de”, las columnas encabezadas con H4 y H5, o la S4, permiten registrar esas respuestas.

Las columnas de la octava a la décima son utilizadas para registrar si se ha seleccionado una tarea proactiva, de la siguiente manera:

Las últimas tres columnas registran la tarea que ha sido seleccionada (si la hay), la frecuencia con la que debe hacerse y el recurso necesario para realizarla. La columna de “Tarea Propuesta” también se utiliza para registrar los casos en los que se requiere rediseño o si ha decidido que el modo de falla no necesita mantenimiento programado.⁷²

La columna titulada H1/S1/O1/N1, es utilizada para registrar si se pudo encontrar una tarea a condición apropiada para anticipar el modo de falla a tiempo como para evitar las consecuencias.

La columna titulada H2/S2/O2/N2, es utilizada para registrar si se pudo encontrar una tarea de reacondicionamiento cíclico apropiada para prevenir las fallas.

La columna titulada H3/S3/O3/N3, se utiliza para registrar si se pudo encontrar una tarea de sustitución cíclica para prevenir las fallas.

Las preguntas “a Falta de”:

Las columnas tituladas H4, H5 Y S4, en la Hoja de Decisión son utilizadas para registrar las respuestas a las tres preguntas “a falta de”.

⁷² MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. Pág. 2, México: Aladon, 2004. Pág. 202-206

Ilustración 32: Diagrama de Decisión - Parte 1

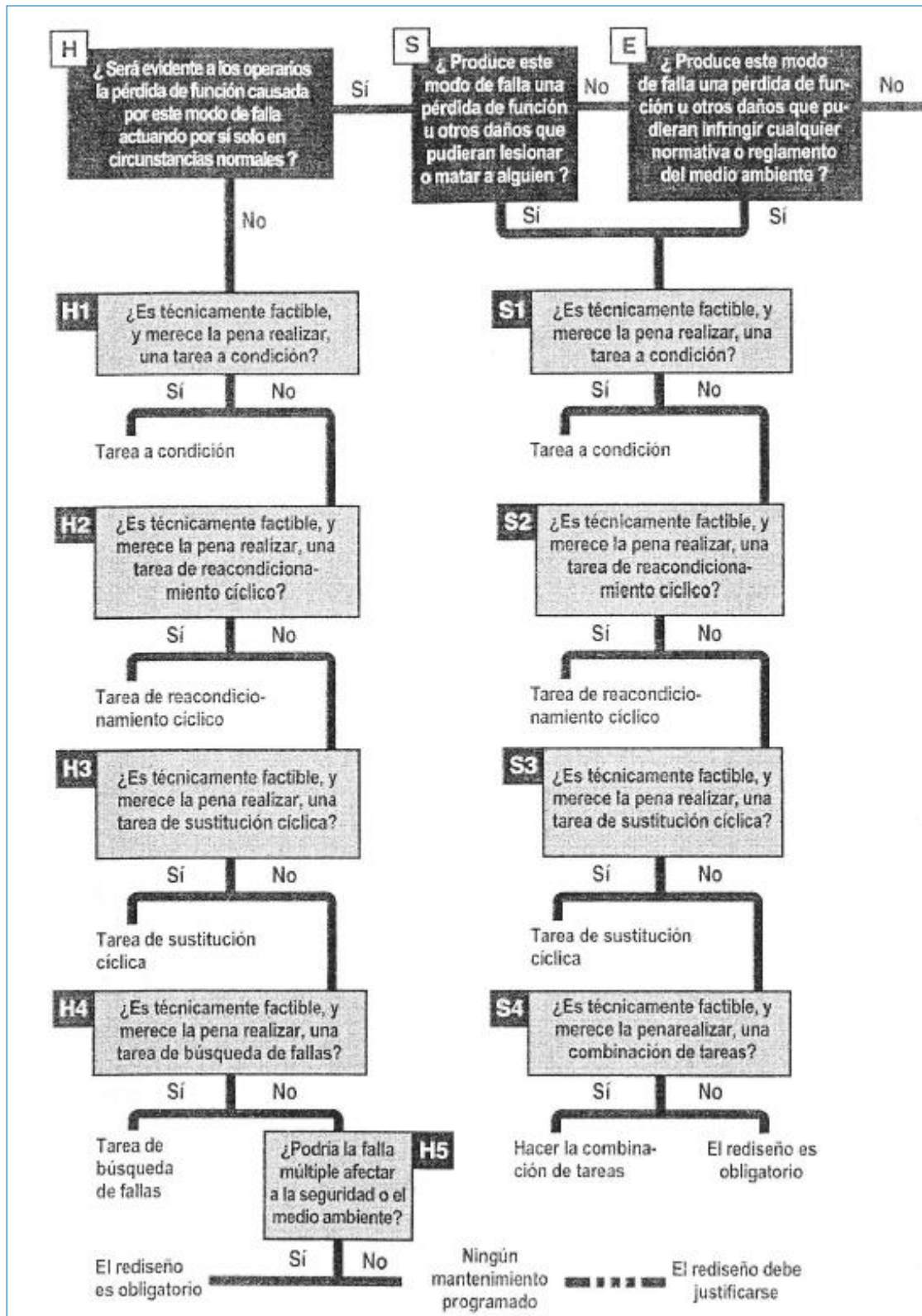
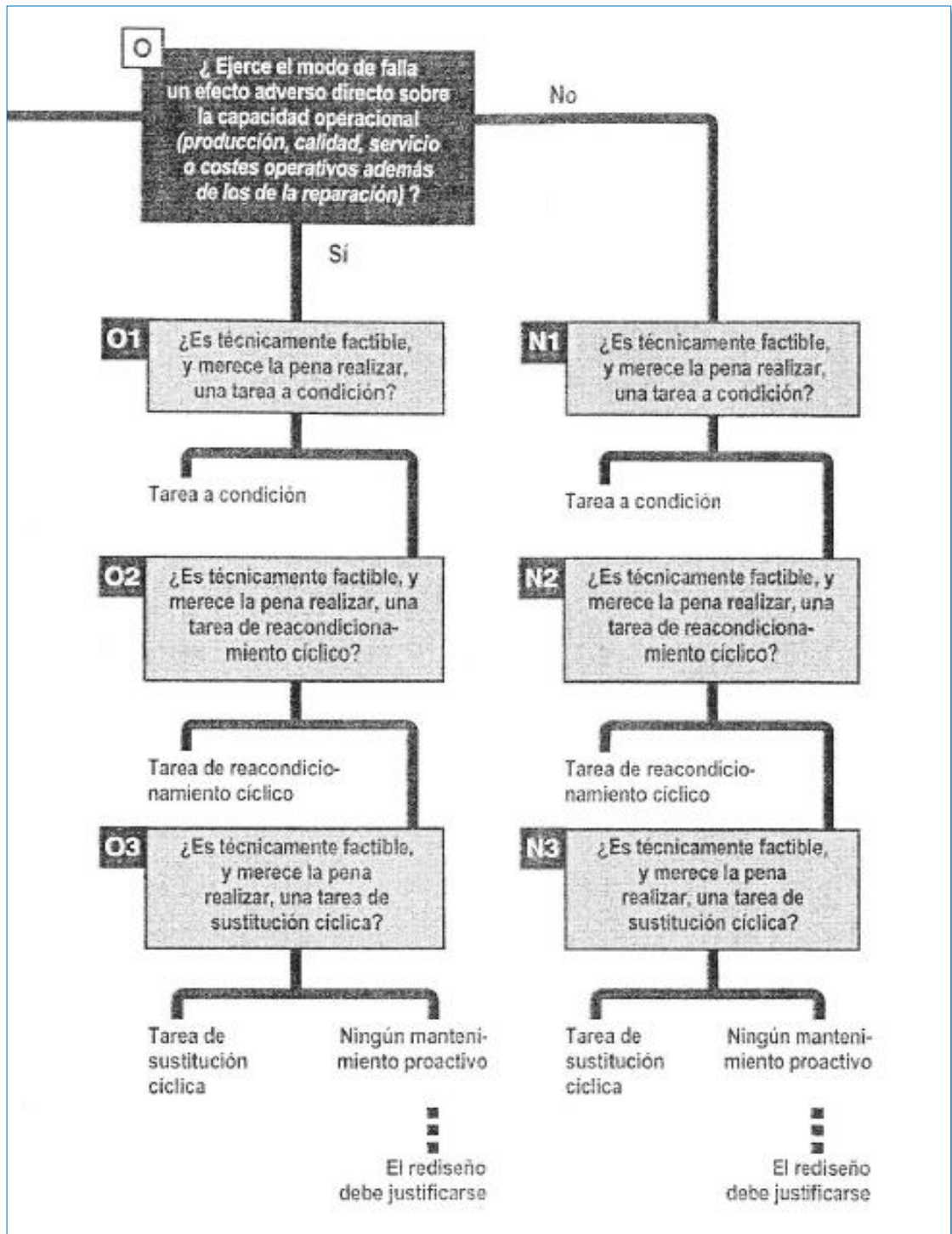


Ilustración 33: Diagrama de decisión RCM - Parte II



Dadas estas pautas, se obtuvo la siguiente Hoja de Decisión para dar respuesta a las preguntas planteadas en el Diagrama de Decisión del RCM:

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a Falta de			Tarea propuesta	Intervalo inicial	A realizarse por
F	FF	MF	H	S	E	O	H4	H5	S4						
1	A	1	S	N	N	S	S						Inspección visual, limpieza de los dientes de la manzana la campana del acople y cambio de grasa	Anual	Técnico mecánico
1	A	2	S	S			S						Inspección especializada del estado del material (ensayo no destructivo de ultrasonido)	Cada 5 años	Inspector especializado
1	B	1	N				S						Limpieza de las partes internas del ventilador (impulsor, compuertas, eje, carcasa)	Bianual	Operador
1	B	2	S	N	N	S	S						Inspección de los parámetros de funcionamiento del motor	Semestral	técnico electricista
1	B	3	N				S						Inspección visual del impulsor	Bianual	operador
1	B	4	S	N	N	S	N	N	S				Cambio de empaque	Anual	Técnico mecánico
1	B	5	S	N	N	S	S						Revisión de las tolerancias entre el impulsor y el cono de succión	Anual	Técnico mecánico
1	B	6	S	N	N	S			N				Correr a falla	-	-

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a Falta de			Tarea propuesta	Intervalo inicial	A realizarse por
F	FF	MF	H	S	E	O			H4	H5	S4				
2	A	1	S	N	N	N	S						Inspección del nivel de aceite	Diaria	Operador
2	A	2	S	N	N	N	S						Inspección del nivel de aceite	Diaria	Operador
2	A	3	N				S						Análisis químico del aceite	Semestral	Laboratorio especializado
2	A	4	S	N	N	N	S						Revisión y prueba hidrostática del sistema de enfriamiento	Semestral	Técnico mecánico
2	B	2	S	N	N	N	S						Revisión y/o reajuste del torque de la tornillería de las chumaceras	Semestral	Técnico mecánico
2	B	3	S	N	N	N	S						Revisión y/o reajuste del torque del tornillo de ajuste del cojinete	Semestral	Técnico mecánico
2	B	4	S	N	N	N	S						Revisión del alineamiento del motor usando equipo laser de alineación	Semestral	Técnico mecánico
2	B	5	N				N	S					Restaurar diámetro del eje y/o realizar mejora de acabado usando torno portátil	Cada 5 años	Tornero
2	B	6	S	N	N	N	S						Realizar medición de vibraciones	Mensual	Inspector especializado

8. CONCLUSIONES

- El análisis de criticidad de los equipos de un sistema permite que los resultados se vean más rápido, ya que gracias a él se determinan los equipos que están afectando la confiabilidad del sistema en mayor porcentaje.
- La metodología que enseña el RCM permite generar planes de mantenimiento más eficientes y eficaces.
- La aplicación del RCM permite la interacción entre mantenimiento y producción, lo que retroalimenta y enriquece los conocimientos acerca de los equipos, sus funciones y sus modos de falla, lo que redundará en una alza de la disponibilidad y mantenibilidad de los activos.
- El seguimiento de los modos de fallas y las tareas para evitarlos lleva a un constante mejoramiento continuo que obliga a ser cada vez más precisos hasta llegar a la excelencia en mantenimiento.
- Las tareas de mantenimiento para cada modo de falla son más fáciles de designar utilizando el diagrama de decisión del RCM.

BIBLIOGRAFIA

DISTRAL S.A. Manual de entrenamiento Central Termoeléctrica de la Guajira. Pág. 16 – 18

_____.Manual de entrenamiento Central Termoeléctrica de la Guajira. Pág. 23

_____.Manual de entrenamiento Central Termoeléctrica de la Guajira. Pág. 37 – 38

EPRI. Forced Draft and Induced Draft Fan Maintenance Guide. Pág. 2 – 5, 2006

_____. Forced Draft and Induced Draft Fan Maintenance Guide. Pág. 10, 2006

_____. Forced Draft and Induced Draft Fan Maintenance Guide. Pág. 16 – 19, 2006

_____. Forced Draft and Induced Draft Fan Maintenance Guide. Pág. 23, 2006

_____. Forced Draft and Induced Draft Fan Maintenance Guide. Pág. 43, 2006

E Salvador Escoda S.A. Manual Práctico de Ventilación, Catalogo Técnico, edición 2. Pág. 5

_____.Manual Práctico de Ventilación, Catalogo Técnico, edición 2. Pág. 13

_____.Manual Práctico de Ventilación, Catalogo Técnico, edición 2. Pág. 15

_____.Manual Práctico de Ventilación, Catalogo Técnico, edición 2. Pág. 17

– 20

GONZALEZ ROBLES, William. SANCHEZ QUINTERO, Rudin. OSPINA GARCIA, Pablo. Diseño de una estrategia de Mantenimiento RCM para el sistema de control electrónico de un motocompresor INGERSOLL RAND 12SVG. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Mecánica. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga. 2005. Pág. 100 – 103.

_____.Diseño de una estrategia de Mantenimiento RCM para el sistema de control electrónico de un motocompresor INGERSOLL RAND 12SVG. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Mecánica. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga. 2005. Pág. 106 – 108.

KOHAN, Anthony Lawrence. Manual de Caldera: Principios operativos de mantenimiento, construcción, instalación, reparación, seguridad, requerimientos y normativas. Pág. 15, España: McGraw-Hill 2000

_____.Manual de Caldera: Principios operativos de mantenimiento, construcción, instalación, reparación, seguridad, requerimientos y normativas. Pág. 27, España: McGraw-Hill 2000

_____. Manual de Caldera: Principios operativos de mantenimiento, construcción, instalación, reparación, seguridad, requerimientos y normativas. Pág. 497, España: McGraw-Hill 2000

MHI, Mitsubishi Ltda. Manual de Instrucciones, Corporación Eléctrica de la costa Atlántica, Central Termoeléctrica del Cerrejón Unidad I, Equipos de Combustión Vol. M-3 ½. 1891.

MORA, Alberto. Mantenimiento Industrial efectivo. Pág. 20 – 23, Medellín: Coldi, 2008

_____.Mantenimiento Industrial efectivo. Pág. 25, Medellín: Coldi, 2008

_____.Mantenimiento Industrial efectivo. Pág. 271 – 273, Medellín: Coldi, 2008

MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. Pág. 2 – 7, México: Aladon, 2004.

_____.Mantenimiento centrado en confiabilidad. Pág. 6, México: Aladon, 2004.

_____.Mantenimiento centrado en confiabilidad. Pág. 12 – 14, México: Aladon, 2004.

_____.Mantenimiento centrado en confiabilidad. Pág. 2, México: Aladon, 2004.Pág. 202-206

SAE JA1011—Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes.

SAE JA1012— A Guide to Reliability-Centered Maintenance (RCM)

TOVAR GUTIERREZ, Guillermo. Análisis de criticidad y formulación de un plan de mantenimiento rutinario para los molinos de bolas. Universidad Simón

Bolívar. Decanato de Estudios de Postgrado. Especialización en Diseño y Mantenimiento Industrial. Barranquilla, 2007. Pág. 18 – 20.

_____.Análisis de criticidad y formulación de un plan de mantenimiento rutinario para los molinos de bolas. Universidad Simón Bolívar. Decanato de Estudios de Postgrado. Especialización en Diseño y Mantenimiento Industrial. Barranquilla, 2007. Pág. 21 – 23.

ANEXOS

ANEXO A. Tratamiento de la información

ANEXO B. Análisis de criticidad

ANEXO C. Hoja de información y Hoja de Decisión RCM