

**MODELO DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD RCM PARA
LOS PRECALENTADORES DE AIRE REGENERATIVO DE LA CENTRAL
TERMOGUAJIRA, GECELCA S.A. E.S.P.**

**EVER ENRIQUE ROMERO VARGAS
LUIS DANIEL DURAN ALTAMIRANDA**

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

2018

**MODELO DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD RCM PARA
LOS PRECALENTADORES DE AIRE REGENERATIVO DE LA CENTRAL
TERMOGUAJIRA, GECELCA S.A. E.S.P.**

**EVER ENRIQUE ROMERO VARGAS
LUIS DANIEL DURAN ALTAMIRANDA**

**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**

2018

DEDICATORIA

Le doy gracias a Dios por darme la oportunidad de crecer profesionalmente y dedico este logro a mi familia que son el motivo de mi vida, sin ellos nada hubiera sido posible. Gracias a todas las personas que hicieron parte de mi vida en este camino.

EVER ROMERO VARGAS

DEDICATORIA

Doy gracias a Dios, por permitirme realizar esta especialización y respaldarme todos los días, Por contar con el apoyo de mi familia. Mi padre Jairo Duran, mi Madre Vilma Altamiranda, mi novia Karina Peña, mi abuela, Ana Cecilia y mi hijo Mathías Duran. gracias a ellos se dio este importante paso. Son quienes me motivan y dan fuerzas para alcanzar nuevas metas y ser mejor día a día

A mi compañero y amigo Ever Romero con quien comparto esta monografía y me motivó para realizar esta especialización, a todos los profesores quienes aportaron a mi vida grandes conocimientos en esta bella etapa.

LUIS DANIEL DURAN ALTAMIRANDA

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	16
1 GECELCA S.A E.S.P.....	17
1.1 HISTORIA.....	17
1.2 MISIÓN.....	18
1.3 VISIÓN	18
1.4 UBICACION.....	18
1.5 SERVICIOS	19
1.6 ORGANIGRAMA	19
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
2.1 OBJETIVOS	21
2.1.1 Objetivo general	21
2.1.2 Objetivos específicos	21
2.2 JUSTIFICACION DEL PLAN PROPUESTO.....	22
3 ANÁLISIS DE LA LITERATURA RECOPIADA	23
3.1 MARCO CONCEPTUAL.....	23
3.1.1 Mantenimiento.....	Error! Bookmark not defined.
3.1.2 Mantenimiento centrado en confiabilidad RCM.....	25
3.1.3 Fallas Funcionales.	27
3.1.4 Modos de Falla.....	27
3.1.5 Efectos de las Fallas.	27
3.1.6 Consecuencias de falla.	28
3.1.7 Elementos importantes de la confiabilidad.....	28
3.1.8 Central Térmica (Planta Termoeléctrica).....	33
4 TAXONOMIA DE OPERACION	35
4.1 INFORMACION TÉCNICA DEL PRECALENTADOR DE AIRE	37

4.2	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	39
4.3	COMPONENTES DEL PRECALENTADOR DE AIRE	39
4.3.1	Rotor principal	40
4.3.2	Sistema de transmisión	40
4.3.3	Sellos	41
4.3.4	Canastas	42
4.3.5	Cojinetes	43
4.3.6	Sistema de lubricación	43
4.3.7	Sopladores	44
4.3.8	Instrumentación.....	44
4.4	INFORMACION HISTORICA DE FALLAS	45
4.4.1	Modos de falla.....	46
4.4.2	Fallas por componente.....	48
5	ANALISIS DE MODO DE FALLAS, EFECTOS Y CRITICIDAD.....	51
5.1	DEFINICION DE LA INTENCION DE DISEÑO	52
5.2	ANALISIS FUNCIONAL.....	52
5.3	IDENTIFICACIÓN DE MODOS DE FALLA	53
5.4	EFECTOS DE LA FALLA	53
5.5	CONSECUENCIAS DE LA FALLA.....	53
5.6	SEVERIDAD DE LA FALLA	54
5.7	DETECCION DE FALLAS	55
5.8	JERARQUIZACION DEL RIESGO	56
5.9	ANALISIS DE CRITICIDAD.....	57
5.9.1	Desarrollo del análisis	57
5.9.2	Resultados del análisis de criticidad	60
5.10	FMEA PRECALENTADOR DE AIRE	61
6	IDENTIFICACION DE COMPONENTES A LOS CUALES SE LES APLICARA LA METODOLOGÍA RCM.....	63
7	DIAGRAMA DE DECISIÓN RCM	64

7.1	HOJA DE DECISION RCM.....	67
8	FORMATO DE INSPECCION PREVENTIVA PARA EL PRECALENTADOR DE AIRE REGENERATIVO	71
9	CONCLUSIONES	73
	BIBLIOGRAFÍA.....	74

1.1.1.1 LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Flujos, presiones y temperaturas del sistema.	37
Tabla 2. Especificaciones técnicas del Precalentador de aire regenerativo.	38
Tabla 3. Historial de modos de falla.....	46
Tabla 4. Fallas totales por componente.	48
Tabla 5. Promedio anual de fallas en los Precalentadores	50
Tabla 6. Criterios de evaluación y clasificación para la ocurrencia de los modos de falla	54
Tabla 7. Criterios de evaluación de la severidad de los efectos	55
Tabla 8. Criterio de evaluación y sistema de clasificación para la detección de una causa de falla.....	56
Tabla 9. Componentes del Precalentador de aire regenerativo A y B u1	57
Tabla 10. Información de costos y tiempos de reparación.	58
Tabla 11. Criterios de evaluación.....	59
Tabla 12. Resultados de análisis de criticidad	60
Tabla 13. Análisis de modos de fallas y efectos.	61
Tabla 14. Selección de metodología de mantenimiento.	63
Tabla 15. Hoja de decisión RCM del precalentador de aire.	68

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Central Térmica de la Guajira – Termoguajira	18
Figura 2. Organigrama Gecelca SA ESP	19
Figura 3. Etapas de mantenimiento en el tiempo.....	24
Figura 4. Perspectiva de una central térmica.....	34
Figura 5. Precalentador de aire regenerativo.....	39
Figura 6. Componentes del sistema de transmisión.	41
Figura 7. Características técnicas de las canastas.	42
Figura 8. Ilustración del soplado de las canastas.	44
Figura 9. Representación gráfica de los modos de falla	47
Figura 10. Representación gráfica de fallas por componentes	49
Figura 11. Diagrama de barras, resultado del análisis de criticidad	60
Figura 12. Diagrama de decisión RCM.	65
Figura 13. Formato de inspección preventiva diaria	71
Figura 14. Formato de inspección preventiva trimestral	72

LISTA DE ANEXOS

(Ver anexos adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS)

ANEXO A. Historial de fallas

ANEXO B. Análisis de criticidad

ANEXO C. Failure Mode Effects Analysis (FMEA)

ANEXO D. Hoja de decisión RCM

RESUMEN

TÍTULO: MODELO DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD RCM PARA LOS PRECALENTADORES DE AIRE REGENERATIVO DE LA CENTRAL TERMOGUAJIRA, GECELCA S.A. E.S.P. ¹

AUTORES:

EVER ENRIQUE ROMERO VARGAS
LUIS DANIEL DURAN ALTAMIRANDA

PALABRAS CLAVES:

GENERACIÓN, PRECALENTADOR DE AIRE REGENERATIVO, CALDERA

DESCRIPCIÓN:

El principal objetivo de este proyecto es implementar la metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) para minimizar el impacto que genera una indisponibilidad de las Centrales térmicas de Termoguajira.

Estas plantas ubicadas a la orilla del mar están padeciendo por el alto porcentaje de humedad en el ambiente y el impacto en los equipos por la corrosión y por el propio sistema de ceniza es considerable. Por esto es necesario realizar estrategias que ayuden a minimizar las fallas presentadas en los equipos.

En vista de los problemas presentados, el departamento de mantenimiento debe de garantizar la funcionalidad de la central Termoguajira; por eso en este proyecto se busca mejorar la confiabilidad de uno de los equipos principales y más importantes de la caldera; el Precalentador de aire regenerativo.

Con los objetivos planeados se busca identificar los componentes críticos de este equipo, analizar los modos de falla y sus efectos para así implementar estrategias que permitan aumentar la confiabilidad del equipo.

En esta monografía se implementarán rutinas de mantenimiento que permitan anticiparse a las fallas que se presentan en los precalentadores de aire regenerativo y así reducir costos aumentar la disponibilidad y minimizar los riesgos de fallas que puedan presentarse.

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: RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE MODEL FOR THE REGENERATIVE AIR PREHEATERS OF THE TERMOGUAJIRA POWER PLANT, GECELCA S.A. E.S.P. ²

AUTHORS:

EVER ENRIQUE ROMERO VARGAS
LUIS DANIEL DURAN ALTAMIRANDA

KEY WORDS:

GENERATION, REGENERATIVE AIR PREHEATER, BOILER.

DESCRIPCIÓN:

The main objective of this project is to implement the reliability centered maintenance (RCM) to minimize the impact generated by the unavailability of Termoguajira thermal power plants.

These plants located on the seashore are suffering from the high percentage of humidity in the environment and the impact on the equipment due to corrosion and the ash system itself is considerable. This is why it is necessary to carry out strategies that help to minimize the failures presented in the equipment.

In view of the problems presented, the maintenance department must guarantee the functionality of the Termoguajira plant; therefore, this project seeks to improve the reliability of one of the main and most important equipment of the boiler; The regenerative air preheater.

With the planned objectives it is sought to identify the critical components of this equipment, analyze the failure modes and their effects in order to implement strategies that increase the reliability of the equipment.

In this monograph, maintenance routines will be implemented to anticipate failures that occur in regenerative air pre-heaters and thus reduce costs increase availability and minimize the risks of faults that may arise.

² Grade Monograph

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

INTRODUCCION

Los planes y las estrategias de mantenimiento son indispensables para lograr la rentabilidad de la compañía haciendo que los equipos trabajen con sus parámetros de diseño y de forma segura, es por lo que una buena estrategia de mantenimiento garantiza la reducción de tiempos de paradas y aumenta la confiabilidad en los equipos.

El departamento de mantenimiento está en la obligación de garantizar la alta productividad en los activos, reducir costos y fallas a nivel operacional. Esto indica que desde los técnicos hasta los ingenieros está en la obligación de transformarse e innovar, implementar nuevas estrategias nuevos planes que garanticen la productividad en las plantas fortaleciendo la calidad de los técnicos al momento de intervenir un activo, disminuir al máximo los tiempos de paradas por fallas imprevistas. Por estas razones se decidió implementar la metodología de (RCM) El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Ya que es una metodología que se basa en la toma de datos históricos para predecir fallas garantizando una alta confiabilidad y disponibilidad en los equipos reduciendo costos por paradas imprevistas y por fallas en los activos, otro de los principales beneficios de implementar la metodología (RCM) es que favorece el conocimiento específico de los equipos ya que permite aprovechar la experiencia y el conocimiento de grupos interdisciplinarios de trabajo que favorecen al aporte de idea al momento de implementar esta metodología.

El presente trabajo nos permite observar el mantenimiento desde un punto de vista estratégico, ya que aumenta la rentabilidad de la empresa y permite dar un nuevo enfoque que este alineado con las estrategias de la compañía al momento de hacer un balance de costo - beneficio.

2 GECELCA S.A E.S.P.

2.1 HISTORIA

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 de tipo 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 Reseña Histórica de Gecelca S.A. E.S.P. [En línea] [Fecha de consulta: 07 mayo 2018]. Disponible en: <http://www.gecelca.com.co/index.php/empresa/resena-historica>

2.2 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.

2.3 VISIÓN

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

2.4 UBICACION

Figura 1. Central Térmica de la Guajira – Termoguajira



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

Lote: Ciento cincuenta (150) hectáreas a seis (6) Kilómetros de Mingueo sobre la litoral Atlántico

Corregimiento: Mingueo, ochenta Kilómetros sobre la Troncal del Caribe.

Departamento: Guajira, Colombia

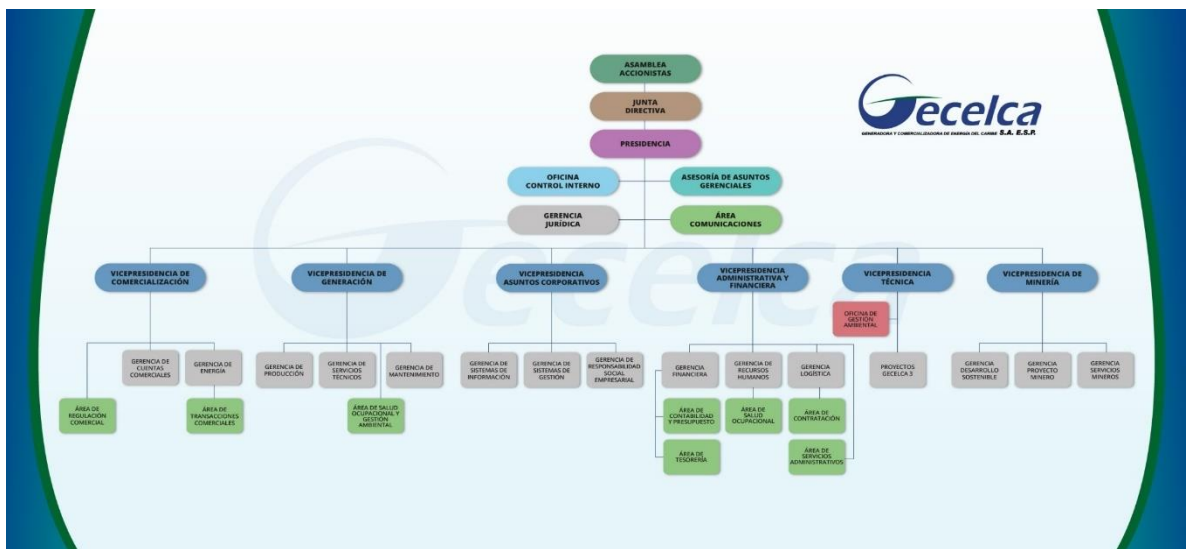
2.5 SERVICIOS

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.

2.6 ORGANIGRAMA

Figura 2. Organigrama Gecelca SA ESP



Fuente: Gecelca S.A.E.S.P. Organigrama [En línea] [Fecha de consulta: 07 mayo 2018]. Disponible en: <https://www.gecelca.com.co/index.php/empresa/quienes-somos/organigrama-gecelca>

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Gecelca S.A E.S.P. Cuenta con dos unidades de generación 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.

Esta ubicación geográfica, a la orilla del mar, que tanto ha beneficiado el mercado de la compañía, se ha convertido en el principal enemigo de las plantas ocasionando el deterioro prematuro de los equipos y por ende ha aumentado la labor del personal de mantenimiento. A medida que pasan los años la situación empeora y los equipos principales de los sistemas van perdiendo su eficiencia y capacidad de diseño.

Unos de estos equipos principales es el Precalentador de aire regenerativo, que es uno de los elementos más importantes para la combustión de la caldera. Este es un intercambiador de calor cuyo objetivo es aumentar la temperatura del aire extrayendo el calor de los gases de combustión y adicionarlo a los ventiladores que lo transportan a la caldera.

Se necesita aire caliente para una combustión rápida en la caldera y también para secar el carbón en las plantas de molienda. Entonces, un equipo esencial de la caldera que sirve para este fin es el Precalentador de aire regenerativo.

Debido a la importancia de este, es necesario implementar un plan que permita generar mayor confiabilidad del sistema mediante la inspección, planeación, programación y ejecución del mantenimiento; evitando fallas críticas que generen indisponibilidad de las unidades de generación y, por ende, millonarias pérdidas en la producción.

3.1 OBJETIVOS

3.1.1 Objetivo general. Diseñar un modelo de mantenimiento centrado en confiabilidad RCM para los Precalentadores de aire de la central Termoguajira, Gecelca S.A. E.S.P

3.1.2 Objetivos específicos.

- ✓ Realizar el método de análisis de los modos de fallas, efecto y su criticidad (FMECA) al Precalentador
- ✓ Identificar los componentes a los cuales se les aplicara la metodología RCM.
- ✓ Realizar la hoja de decisión de la metodología RCM para asignar las tareas y preservar cada una de las funciones del equipo.
- ✓ Elaborar un formato de inspección preventiva con el fin de identificar fallas por medio de mediciones, limpieza periódica, ajustes y lubricación de componentes.

3.2 JUSTIFICACION DEL PLAN PROPUESTO

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 colombiana.

Es una compañía orientada al cliente, que desarrolla sus procesos teniendo como finalidad la creación y consolidación de relaciones comerciales de largo plazo.

El principal motivo de este proyecto es el impacto económico, social y legal que se enfrenta la empresa al presentarse una indisponibilidad de estas unidades, las pérdidas y las multas por la no generación son de miles de millones.

Otros motivos importantes son el ambiente salino en el cual está operando la central y la contaminación causada por el sistema de ceniza y carbón, pues la corrosión y la ceniza están afectando de manera considerable el funcionamiento de los equipos principales

El departamento de mantenimiento es el encargado que garantizar la funcionalidad de la central Termoguajira; por tal motivo en este proyecto se busca mejorar la confiabilidad de uno de los equipos principales y más importantes de la caldera; el Precalentador de aire regenerativo.

4 ANÁLISIS DE LA LITERATURA RECOPIADA

4.1 MARCO CONCEPTUAL

La optimización de las estrategias de mantenimiento se ha convertido en un tema importante para las compañías cuando se trata de conseguir mayor productividad en sus procesos. Pues, una mayor confiabilidad reduce las fallas en los equipos, aumenta la producción, reduce los costos de operación, aumenta la seguridad en los puestos de trabajo y disminuye los riesgos ambientales.

4.1.1 Mantenimiento. En un principio mantener era sinónimo de reparar cuando existía una falla, pero con el tiempo pasó a ser visto como reparaciones programadas para aumentar la vida útil de los equipos. Según Moubray, hoy en día las fallas en los equipos no solo afectan la producción y se está buscando crear conciencia de la relación entre mantenimiento, la calidad del producto, la seguridad, el medio ambiente y la presión alcanzar una alta disponibilidad en la planta para mantener acotado el costo⁴.

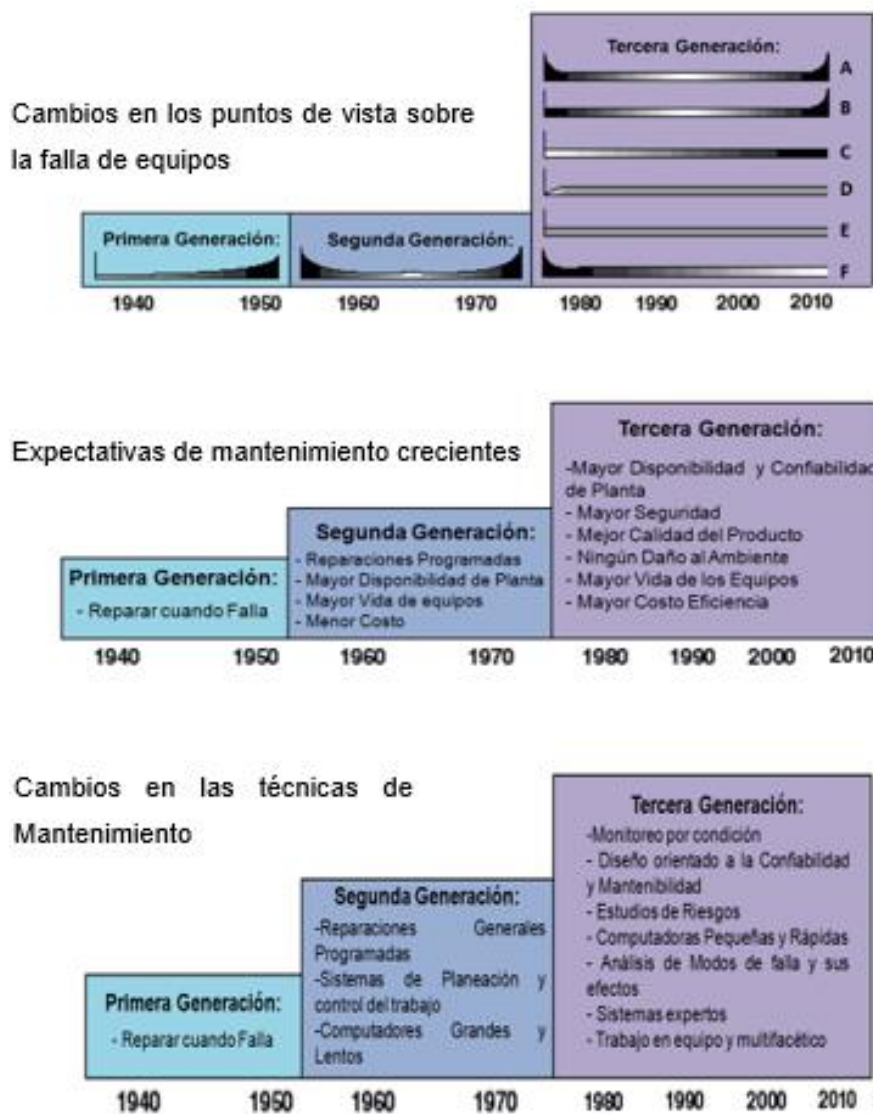
El artículo ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO Y CORRECTIVO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS EN UNA PLANTA TREFILADORA afirma que al mantenimiento a nivel industrial, las compañías lo ven como un mal necesario, lo miran como un gasto o una pérdida en el que la empresa debe cometer para mantener en operación su proceso productivo. Puesto a esto, las necesidades de la compañía no se basan normalmente en el mantenimiento de sus equipos sino en la producción que estos entregan⁵

⁴ MOUBRAY, Jhon. (2004). *Mantenimiento centrado en confiabilidad II*. México: Aladon.

⁵ MATA, Daniel; ALLER, José Manuel; BUENO, Alexander. (2008). Análisis probabilístico del mantenimiento predictivo y correctivo de máquinas eléctricas rotativas en una planta trefiladora. *SciELO - Scientific electronic library online*.

Esta visión del mantenimiento representa un avance significativo de lo que debe ser el objetivo del mantenimiento. John Moubray, en su libro *Mantenimiento centrado en confiabilidad*, distingue un camino de tres generaciones de mantenimiento al observar cuales eran las prácticas utilizadas en cada época.

Figura 3. Etapas de mantenimiento en el tiempo.



Fuente: Reliability

Centered Maintenance RCM II, John Moubray (2004)

4.1.2 Mantenimiento centrado en confiabilidad RCM. Es una estrategia de mantenimiento que permite realizar una evaluación y selección de procesos que se puedan implementar en forma eficiente y segura en un sistema o equipo.

En el artículo “Application of RCM to a médium scale industry”, sus autores complementan que la metodología RCM es completamente descrita en cuatro características únicas.

- Preservar las funciones del equipo
- Identificar modos de falla que puedan obstaculizar a la función
- Priorizar las funciones principales (a través de modos de falla)
- Seleccione solo tareas aplicables y efectivas.⁶

En el Libro de RCM II de John Moubray el autor plantea que RCM es un 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 actual⁷”.

La Norma SAE JA1011 define el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad como un proceso usado para identificar los métodos que deben ser implementados para administrar los modos de falla que pueden causar fallas funcionales en cualquier activo físico en su contexto operacional⁸”

⁶ DESHPANDE, V. S., & MODAK, J. P. (2002). Application of RCM to a medium scale industry. *Reliability Engineering and System Safety*, 31-34

⁷ MOUBRAY, Jhon. (2004). *Mantenimiento centrado en confiabilidad*. México: Aladon.

⁸ SAE JA1011. (s.f.). *Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM)*.

En el libro ingeniería de mantenimiento. El autor Santiago García lo define como una técnica más dentro de las posibles que ya existen para realizar un plan de mantenimiento en una empresa industrial y contiene ciertas ventajas muy marcadas de las otras técnicas de mantenimiento que favorecen los indicadores en la compañía⁹

En el artículo de FUNDAMENTOS PARA LA INTRODUCCION DEL RCM A LA INDUSTRIA AZUCARERA. Define que los mantenimientos son las acciones de orden técnico necesarias para la preservación o restablecimiento de la capacidad inicial de su función en los equipos o máquinas de producción¹⁰.

4.1.2.1 Las Siete Preguntas Básicas del RCM. Uno de los principales objetivos del RCM es poner al descubierto todos los fallos potenciales que pueden tener un equipo o sistema, identificando las causas que los ocasionan y en la designación de medidas de precaución que eviten esos fallos teniendo en cuenta la importancia y el efecto que tiene cada fallo. Esto nos lleva a plantearnos una serie de preguntas claves que se deben resolver.

- 1** ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional?
- 2** ¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?
- 3** ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?
- 4** ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
- 5** ¿En qué sentido es importante cada falla?
- 6** ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?
- 7** ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

⁹ GARCIA GARRIDO , Santiago. (2009 -2012). Ingeniería de Mantenimiento.

¹⁰ MOJICAR CABALLERO, Segismundo. Fundamentos para la introduccion del RCM a la industria azucarera. Cuba

Cada respuesta que se obtiene de estas 7 preguntas nos da la certeza de los fallos potenciales que se presentan en los equipos como también que causo los fallos y las medidas preventivas a tomar para sistema.

4.1.3 Fallas Funcionales. El paso siguiente es identificar cómo puede fallar cada elemento en la realización de sus funciones, lo que es conocido comúnmente como falla funcional, la cual ocurre cuando un activo no puede cumplir una función de acuerdo con el parámetro de funcionamiento que el usuario considero aceptable.

Se deben de definir fallas funcionales por cada función. Una función puede tener varias fallas funcionales, las cuales se deben registrar.

4.1.4 Modos de Falla. El próximo paso es tratar de identificar todos los hechos que de manera razonablemente posible puedan haber causado cada estado de falla. Esto permite comprender exactamente qué es lo que puede que se esté tratando de prevenir.

Un modo de falla origina una falla funcional y la función del Objeto RCM se afecta negativamente. Se definen modos de falla por cada falla funcional y cada una de estas puede tener varios modos de falla.

4.1.5 Efectos de las Fallas. El siguiente paso del proceso de RCM, enfatiza enlistar los efectos de cada falla, que describan lo que ocurre con cada modo de falla. Concretamente, al describir los efectos de una falla, debe hacerse constar lo siguiente:

- Qué evidencia existe de que se ha producido una falla.

- De qué modo la falla supone una amenaza para la seguridad o el medio ambiente.
- De qué manera afecta a la producción o a las operaciones.
- Los daños físicos han sido causados por la falla.
- Qué debe hacerse para reparar la falla.

El proceso de contestar sólo a las cuatro primeras preguntas produce oportunidades sorprendentes y a menudo muy importantes de mejorar el funcionamiento y la seguridad, y también de eliminar errores. También mejora enormemente los niveles generales de comprensión acerca del funcionamiento de los equipos.¹¹

4.1.6 Consecuencias de falla.

4.1.6.1 Consecuencias Operacionales. Una falla tiene consecuencias operacionales si afecta la producción (capacidad, calidad del producto, servicio al cliente o costos industriales en adición al costo directo de la reparación). Estas consecuencias cuestan dinero, y lo que cuesten sugiere cuanto se necesita gastar en tratar de prevenirlas.

4.1.6.2 Consecuencias no operacionales. Las fallas evidentes que caen dentro de esta categoría no afectan ni a la seguridad ni a la producción, por lo que el único gasto directo es el de la reparación.

4.1.7 Elementos importantes de la confiabilidad. Según el artículo LA CONFIABILIDAD, LA DISPONIBILIDAD Y LA MANTENIBILIDAD, DISCIPLINAS MODERNAS APLICADAS AL MANTENIMIENTO se define confiabilidad como la “confianza” que se tiene de que un componente, equipo o sistema realice la función

¹¹ MOUBRAY, J. (2004). Mantenimiento centrado en confiabilidad II. Aladon Ltd.

básica para la cual fue diseñada, durante un período de tiempo preestablecido, bajo condiciones normales de operación¹².

Otra definición que hace referencia sobre la confiabilidad explica que es la probabilidad de que un activo pueda desempeñar su función establecida durante un periodo de tiempo bajo condiciones de uso de marcadas.¹³

La confiabilidad de un equipo o producto puede ser expresada a través de la expresión:

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

Donde:

$R(t)$ = Confiabilidad de un equipo en un tiempo t dado

e = constante Neperiana ($e = 2.303..$)

λ = Tasa de fallas (número total de fallas por período de operación)

t = tiempo

La confiabilidad es la probabilidad de que no ocurra una falla de determinado tipo, para una misión definida y con un nivel de confianza dado.

4.1.7.1 Mantenibilidad. Es la probabilidad que un equipo pueda ser puesto en condiciones operacionales en un tiempo dado, se caracteriza por el tiempo

¹² MESA GRAJALES, Dairo ORTIZ SÁNCHEZ, Yesid PINZÓN, Manuel. (2006). La Confiabilidad, La Disponibilidad y La Mantenibilidad, Disciplinas Modernas aplicadas al mantenimiento. Scientia et Technica Año XII

¹³ MESA GRAJALES, Dairo ORTIZ SÁNCHEZ, Yesid PINZÓN, Manuel. (2006). La Confiabilidad, La Disponibilidad y La Mantenibilidad, Disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento. Scientia et Technica Año XII

promedio para reparar (MTTR) y depende de varios factores entre los que se encuentran¹⁴:

- Características de diseño de los equipos como modularidad, estandarización y facilidad de acceso a partes propensas a falla.
- Organización y eficiencia de las dependencias de mantenimiento.

Factores internos.

Acceso a las partes.

Complejidad técnica (Diseño).

Manuales claros y completos.

Partes o piezas estandarizadas.

Manejo de componentes (peso, fragilidad, entre otras).

Calidad de los materiales de fabricación.

Herramental necesario estandarizado.

Factores externos.

Disponibilidad de los repuestos.

Disponibilidad de mano de obra.

Capacitación de especialistas (Habilidad).

Herramientas para diagnóstico y reparación.

Capacidad en la programación de tareas.

Servicio post venta.

Limpieza y estado de la máquina.

Historial de averías y procedimientos.

Procedimientos y recursos disponibles.

¹⁴ BORRAS PINILLA, C. (2017). Especialización en gerencia de mantenimiento. *Clase de Mantenimiento Preventivo*. Barranquilla.

El artículo LA CONFIABILIDAD, LA DISPONIBILIDAD Y LA MANTENIBILIDAD, DISCIPLINAS MODERNAS APLICADAS AL MANTENIMIENTO nos dice que La mantenibilidad se puede definir como la probabilidad de que un equipo o sistema pueda ser Puesto en condiciones normales de operación dentro de un lazo de tiempo determinado, cuando la operación del Mantenimiento es ejecutada de acuerdo con Procedimientos establecidos¹⁵.

Según Francois Monchy. (1989), la mantenibilidad es “la probabilidad de reestablecer las condiciones específicas de funcionamiento de un sistema, en límites de tiempo deseados, cuando el mantenimiento es realizado en las condiciones y medios predefinidos.

4.1.7.2 Disponibilidad.

Es el objetivo principal del mantenimiento, y es definida como la capacidad de un equipo de desarrollar las funciones para las que es requerido en un determinado periodo de tiempo.

$$D(t) = \frac{\sum \text{Tiempo disponible para producir}}{\sum \text{Tiempo disponible para producir} + \sum \text{Tiempo en mantenimiento}}$$

Según el artículo LA CONFIABILIDAD, LA DISPONIBILIDAD Y LA MANTENIBILIDAD, DISCIPLINAS MODERNAS APLICADAS AL MANTENIMIENTO la disponibilidad es el objetivo principal del mantenimiento, puede ser definida como la seguridad de que un Equipo o sistema que se le realice algún tipo de mantenimiento, realice Su función eficazmente para un periodo determinado.¹⁶

¹⁵ MESA GRAJALES, Dairo ORTIZ SÁNCHEZ, Yesid PINZÓN, Manuel. (2006). La Confiabilidad, La Disponibilidad y La Mantenibilidad, Disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento. Scientia et Technica Año XII

¹⁶ MESA GRAJALES, Dairo ORTIZ SÁNCHEZ, Yesid PINZÓN, Manuel. (2006). La Confiabilidad, La Disponibilidad y La Mantenibilidad, Disciplinas Modernas aplicadas al mantenimiento. Scientia et Technica Año XII

4.1.7.3 Indicadores. Buscan cuantificar la calidad del servicio de energía eléctrica evaluando varios aspectos. Entre los Indicadores más comunes se encuentran:

- Tasa de falla (λ).

Es el número de fallas de un sistema o componente por unidad de tiempo de exposición.

- Tiempo inactivo por mantenimiento (Mdt).

Maintenance Down time, es el total de tiempo inactivo por mantenimiento programado para un periodo dado de tiempo. Incluye tiempo de logística, disponibilidad de equipo de trabajo y repuestos etc.

- Tiempo medio inactivo (MDT).

Es el tiempo promedio de inactividad causada por mantenimiento programado y no programado, incluyendo cualquier tiempo de logística.

- Tiempo medio entre fallas (MTBF).

Es el tiempo de exposición promedio entre fallas consecutivas de un componente.

- Tiempo Promedio Para Reparar (MTTR).

Es el tiempo medio para reparar o reemplazar un componente. Puede ser estimado dividiendo la suma de los tiempos de reparación entre el número de reparaciones, por lo tanto, es prácticamente el promedio del tiempo de reparaciones. La unidad más común para medir este indicador es de horas.

- Tiempo promedio para mantener (MTTM).

Es el tiempo promedio que toma mantener un componente, incluyendo los tiempos de logística.

4.1.7.4 Indicadores de disponibilidad.

- Disponibilidad Operacional (Ao).

Va más allá al considerar los tiempos de parada por mantenimiento, tiempos de espera de componentes, tiempos de logística etc, proporcionan una medida más real de la disponibilidad del sistema.

- Disponibilidad inherente (Ai).

Considera que la tasa de falla de los componentes y el tiempo medio de reparación de los mismos.

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

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

4.1.8 Central Térmica (Planta Termoeléctrica) Una central térmica es una instalación que produce energía eléctrica a partir de la combustión de carbón, fuel-oil o gas en una caldera que genera el vapor a partir del agua que circula por una extensa red de tubos que tapizan las paredes. El vapor hace girar los álabes de la turbina, cuyo eje rotor gira solidariamente con el de un generador que produce la energía eléctrica; esta energía se transporta mediante líneas de alta tensión a los centros de consumo. Por otra parte, el vapor es enfriado en un condensador y convertido otra vez en agua, que vuelve a los tubos de la caldera, comenzando un nuevo ciclo.

Figura 4. Perspectiva de una central térmica

5 TAXONOMIA DE OPERACION

El precalentador de aire regenerativo es un equipo rotativo de transferencia de calor cuya función es aumentar la temperatura del aire por medio del calor recibido de los gases de combustión, y posteriormente transferir este aire a la Caldera de una Planta Termoeléctrica con el fin de obtener una mejor eficiencia.

Su objetivo principal es el de ahorrar energía. Este se encarga de aumentar la eficiencia total de la caldera en un 8-12% brindando un impacto significativo en la capacidad y la tasa de calor. También proporciona aire caliente para secar y transportar carbón pulverizado y es un activo generador de ingresos; por cada 22°C de aumento en la temperatura del aire de combustión, hay una mejora en la eficiencia total del 1%.¹⁷

El precalentador de aire Mitsubishi – Ljungstrom ha sido construido bajo un estricto control de producción en una fábrica equipada con las facilidades modernas, y ha sido probado bajo normas estrictas para rendir excelente funcionamiento y alta durabilidad.

Sin embargo, para lograr el máximo funcionamiento es necesario operarlo apropiadamente y darle adecuado mantenimiento; mal mantenimiento causara no solo bajo rendimiento sino a demás fallas y corta vida de servicio.

Para operar el precalentador de una manera eficiente, económica y de larga vida, se recomienda referirse al presente manual; este manual muestra la construcción, los métodos de operación y mantenimiento del precalentador

Especificaciones generales

Elemento calefactor	1050 mm DV	0.6 mm SPCC
Capa intermedia	500 mm DV	0.6 mm SPCC

¹⁷ MITSUBISHI - LJUNGSTROM. (s.f.). *Manual de instrucciones del precalentador de aire central termoguajira* (Vol. 2/2). La Guajira.

Capa del extremo frio 300 mm NF 1.2 mm CRLS

Sellos del rotor

Sello radial	1.6 mm acero de baja aleación resistencia a la corrosión.
Sello exterior	1.6 mm acero de baja aleación resistencia a la corrosión.
Sello de derivación	1.6 mm acero de baja aleación resistencia a la corrosión.
Sello axial	1.6 mm acero de baja aleación resistencia a la corrosión.
Sello estático	3.2 mm acero de baja aleación resistencia a la corrosión

Unidad de transmisión del rotor

Motor de inducción trifásico Mitsubishi 7.5 Kw totalmente encapsulado enfriado por aire.

- Reductor de velocidad nippon gear Co. VMS-40
- Embrague de rueda libre formsprag Co. FSO- 500/1.125
- Motor neumático kitagawa pneumatic Tol Co. KFS - 7.5 RH – 400 - 5 FC

Cojinetes de soporte del rotor

Cojinete de soporte	cojinete de empuje de rodillos esféricos 294/500
Cojinete guía	cojinete de rodillos esféricos 23060 EKC3AH60 – AL60

Sistema de circulación de aceites

Motor de inducción trifásico Mitsubishi 0.75 Kw totalmente encapsulado enfriado por aire.

Reductor de velocidades shimadzu seisakuscho, Ltd. 10.000ww 57 g
relación 1 – 10.000 ¹⁸

¹⁸ MITSUBISHI - LJUNGSTROM. (s.f.). *Manual de instrucciones del precalentador de aire central termoguajira* (Vol. 2/2). La Guajira.

5.1 INFORMACION TÉCNICA DEL PRECALENTADOR DE AIRE

Los precalentadores de aire regenerativo Ljungtrom, instalados en la unidad 1 de la Central Térmica de Guajira en Colombia tienen las siguientes especificaciones:

Tabla 1. Flujos, presiones y temperaturas del sistema.

FLOW RATES PER BOILER (Kg/h)	
Gas In	699.110
Gas Out	753.010
Air In	621.148
Air Out	567.820
PRESSURES (mmWg)	
Gas side pressure drop	91
Air side pressure drop	54
Gas Inlet	10,257
Air Inlet	10,41
TEMPERATURA AIRE Y GASES (°C)	
Gas In	388
Gas Out (undiluted)	147
Gas Out (diluted)	139
Air In	31
Air Out	345
LEAKEAGE (%)	
Air to gas leakage	7,71
Heat transfered MW (per boiler)	
Gas	51,47
Air	51,47

Fuente: Propuesta técnica HOWDEN - Elementos de transferencia de calor para Termoguajira U1. Año 2017

Tabla 2. Especificaciones técnicas del Precalentador de aire regenerativo.

GENERAL SPECIFICATIONS	
Marca	Ljungtrom Air Preheater
Referencia	25.5-VI-1850 (U1 Temoguajira)
HEATING ELEMENT	
Hot & hot intermediate layers	Siemens-martin v / openheart /low carbon
Cold end layer	Low alloy / corrosion resistant
ROTOR DRIVE	
Motor	BALDOR 25HP 1770RPM
Speed reducer	Ljungtrom 5 APC ratio 132-1 ; 13.1 RPM
Oil capacity	13 gallons
Lubricator	Mobilgear 600 XP 150
Coupling	Waldron 1-1/2 w
Fluid coupling	Twin disc 12.4 hcm
Bushing	Dodge taperlock
Overrunning clutch	Formprag
Lubricator	Mobil DTE Light
Auxiliary drive	Chicago pneumatic #3501 - RSM
Solenoid valve	ASCO
Coupling	Falk T-10 size 40T
ROTOR SUPPORT BEARING	
Thrust bearing	Kingsbury - series 450
Radial bearing	SKF # 23230 CKJ/C3/W33
Lubricator	Mobilgear 600 XP 320
ROTOR GUIDE BEARING	
Radial bearing	SKF 23052 spherical roller
APPROXIMATE OIL CAPACITY	
Support bearing housing	18 gallons
Guide bearing housing	3 gallons
OIL CIRC SYSTEM - Support bearing	
Motor	General electric - 1/2 HP 1800 RPM
Pump	Viking pum FH 432
Filter	Cuno micro klean

Fuente: Operation and maintenance of Ljungstrom Air Preheater. DISTRAL SA

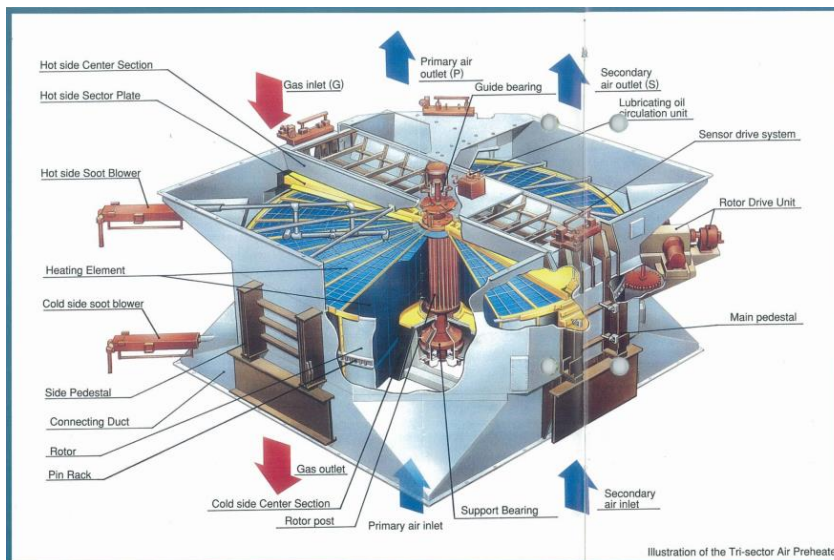
5.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El diseño de este precalentador de aire tiene tres secciones; Una para gases de combustión, una para el aire primario (utilizado para el secado y el transporte de carbón a través del molino hasta el quemador) y otro para el aire secundario (aire adicional para la combustión alrededor de los quemadores)

La carcasa que rodea el rotor está provista de conexiones de conductos en ambos extremos y está sellada adecuadamente por elementos de sellado radial, axial y circunferencial que forman un paso de aire a través de una mitad del precalentador y un paso de gas a través del otro. A medida que el rotor gira de forma lenta las canastas van realizando el recorrido cilíndrico pasando por los dos sectores (aire y gas), el calor es absorbido por las superficies de las canastas cuando pasan a través de la corriente de gas caliente y lo transportan hacia el lado del aire aumentando así la temperatura de la combustión entrante o del aire de proceso.

5.3 COMPONENTES DEL PRECALENTADOR DE AIRE

Figura 5. Precalentador de aire regenerativo.



Fuente: Total engineering service for the Ljungstrom air preheater guide. Pag. 3

5.3.1 Rotor principal. Está conformado por los sectores donde se alojan los elementos de alta eficiencia llamados Canastas, espaciados de forma compacta con compartimentos en una carcasa cilíndrica radialmente dividida y cuenta con un eje central soportado por dos cojinetes ubicados en la parte superior e inferior del mismo.

5.3.2 Sistema de transmisión. El sistema de transmisión se encarga de producir el movimiento giratorio al precalentador, consiste en un motor eléctrico acoplado a un reductor mediante un acoplador hidráulico, el cual es un elemento de transmisión de potencia que transmite desde el eje motor a otro eje (eje del reductor) a través de dos ruedas aladeadas y un fluido de transmisión. La primera gira solidariamente al eje motor. La otra rueda está mecánicamente unida al reductor que va a ser accionado, empieza a girar, la energía mecánica de rotación se transforma en energía cinética del fluido de transmisión, el fluido impulsa a su vez a la rueda secundaria, transformándose su energía cinética de nuevo en energía mecánica, pero ya en el eje de salida.

Se obtiene, por tanto, una transmisión hidráulica sujeta a pérdidas (aproximadamente un 3% de pérdidas en velocidad si la cantidad de fluido de transmisión es la adecuada). El par se mantiene constante en ambos ejes, de forma que las pérdidas de velocidad equivalen a pérdidas de potencia.

Mediante esta forma de transmisión se consigue:

- Arrancar progresivamente el eje del reductor, venciendo así la inercia que este presenta.

- Separar mecánicamente ambas partes, para que un bloqueo o sobrecarga no impacte directamente sobre el motor.
- Poder variar la velocidad del eje del reductor, mediante un control adecuado de la cantidad de fluido de transmisión presente entre las ruedas alabeadas.

En el eje de salida del reductor se encuentra una corona (engranaje), que acopla a la superficie cilíndrica del rotor mediante un mecanismo de pines separados a una distancia que concuerda con el paso de la corona y hace que engranen perfectamente, de esta manera se transmite el movimiento al rotor del precalentador.

Figura 6. Componentes del sistema de transmisión.



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

5.3.3 Sellos. Son unos de los componentes más importantes del precalentador, de ellos depende la eficiencia térmica que se pueda lograr en la Caldera. Su función principal es reducir las filtraciones entre las cámaras de los lados aire y gas.

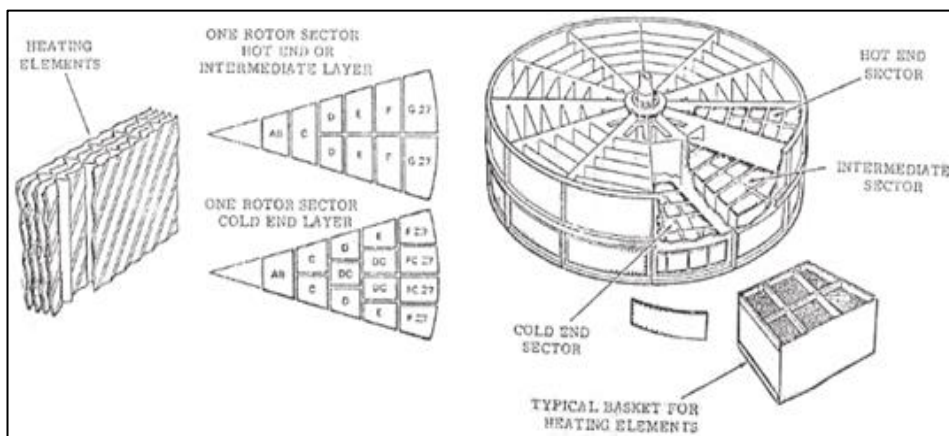
Los precalentadores cuentan con sellos radiales, axiales y circunferenciales, dependiendo del tipo son fijados en puntos estratégicos del rotor con el fin de prevenir las filtraciones de las dos cámaras.

Los sellos se ajustan dejando un espacio mínimo libre del sector plate, el cual está ubicado en la parte superior del rotor y encarga de separar las corrientes de aire y gas. Si la arista del sello toca cualquier punto, este se desgastará y permitirá el pase, lo cual hace perder eficiencia en la caldera. Se deben examinar periódicamente y cambiar cuando haya evidencia de adelgazamiento excesivo o corrosión.

5.3.4 Canastas. Otro de los componentes más importantes del precalentador son los elementos calefactores o canastas, estas son un compacto de láminas metálicas contenidas en el rotor. Su función es transportar el aire del sector frío al sector de los gases de combustión para realizar el proceso de calentamiento.

Los elementos encanastados deben ser cambiados cuando se presente baja eficiencia en la caldera, se pueden remover para realizar limpieza o cambio a través de un manhol de acceso en la carcasa, sin necesidad de tocar los sellos ni ningún otro componente del precalentador. Cuando un borde del elemento de extremo frío se ha desgastado a un tercio de su espesor original, las canastas pueden invertirse para una extensión de la vida útil.

Figura 7. Características técnicas de las canastas.



Fuente: Operation and maintenance of Ljungstrom Air Preheater. DISTRAL SA

5.3.5 Cojinetes. Cuenta con dos (superior e inferior), los cojinetes que utiliza el precalentador de aire son de tipo de rodamiento de rodillos a rotula y trabajan sumergidos en aceite. Tienen dos hileras de rodillos con camino esférico común en el aro exterior siendo, por lo tanto, de alineación automática. El número y tamaño de sus rodillos le dan una capacidad de carga muy grande. Están diseñados para soportar no solamente fuertes cargas radiales sino también cargas axiales considerables en ambas direcciones.

Se caracterizan por:

- Soportan desalineaciones
- Gran capacidad de carga (radiales y axiales elevadas)
- Larga vida útil
- Baja fricción
- Alta resistencia

5.3.6 Sistema de lubricación. Opera como un circuito cerrado y continuo de enfriamiento del aceite ubicado en las cámaras de los cojinetes superior e inferior del precalentador de aire, su función es darle las condiciones de temperatura para evitar fricción y daño en los cojinetes.

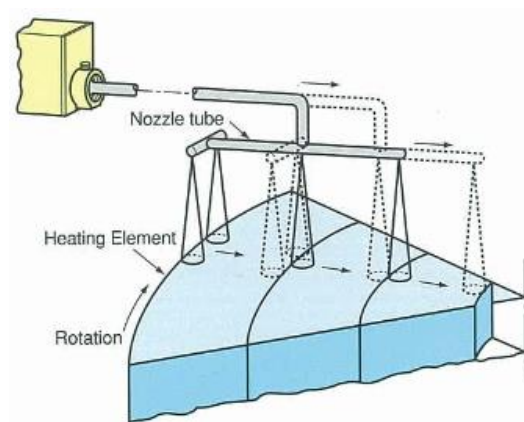
Está conformado por una bomba Viking FH 432, la cual succiona el aceite de la cámara de los cojinetes y lo hace circular por dos enfriadores encargados de bajarle la temperatura para posteriormente pasarlo por los filtros que retienen el paso de impurezas evitando la contaminación del rodamiento. Posterior a esto el aceite entra a la cámara nuevamente para repetir el ciclo.

La selección del lubricante dependerá de la temperatura de operación estipulada en el rodamiento de soporte.

Temperaturas de operación por encima de 80 °C no se recomienda, se debe prevenir con aire de enfriamiento suplementario o mayor aislamiento de las paredes de la carcasa.

5.3.7 Sopladores. Un potente soplador de hollín está instalado en el conducto conectado al lado del extremo frío del precalentador de aire. Trabaja con vapor a alta presión y es el encargado de limpiar los residuos que obstruyen la circulación del aire que pasa a través de los elementos de calentamiento (canastas). El perfil óptimo de la boquilla de chorro se selecciona de acuerdo con los combustibles utilizados y la condición de operación.

Figura 8. Ilustración del soplado de las canastas.



Fuente: Total engineering service for the Ljungstrom air preheater guide. Pag. 9

5.3.8 Instrumentación. El precalentador de aire cuenta con equipos de control de variables que se deben tener en cuenta para la operación segura y confiable del mismo, entre esos se encuentran los sensores de temperatura (termocuplas) ubicados en los cojinetes superior e inferior y en el suministro de aire caliente a la

caldera, indicadores de velocidad para verificar las RPM del equipo, manómetros de presión del sistema de lubricación e indicadores de agua de enfriamiento.

5.4 INFORMACION HISTORICA DE FALLAS

Se realiza recopilación de la información histórica de fallas de los Precalentadores de aire regenerativo obtenida del software de mantenimiento utilizado por la compañía llamado "Mainsaver".

La información encontrada mostró 82 eventos desde el 16 de julio de 2000 hasta el 26 de enero de 2016 que están relacionados directamente con los componentes de los precalentadores A y B de la unidad 1 de Termoguajira.

Se procedió a filtrar la información para realizar mejor análisis del sistema en el cual se identificó los tipos de falla presentados, el histórico de fallas por componente y los promedios de falla de cada uno de ellos en el tiempo analizado.

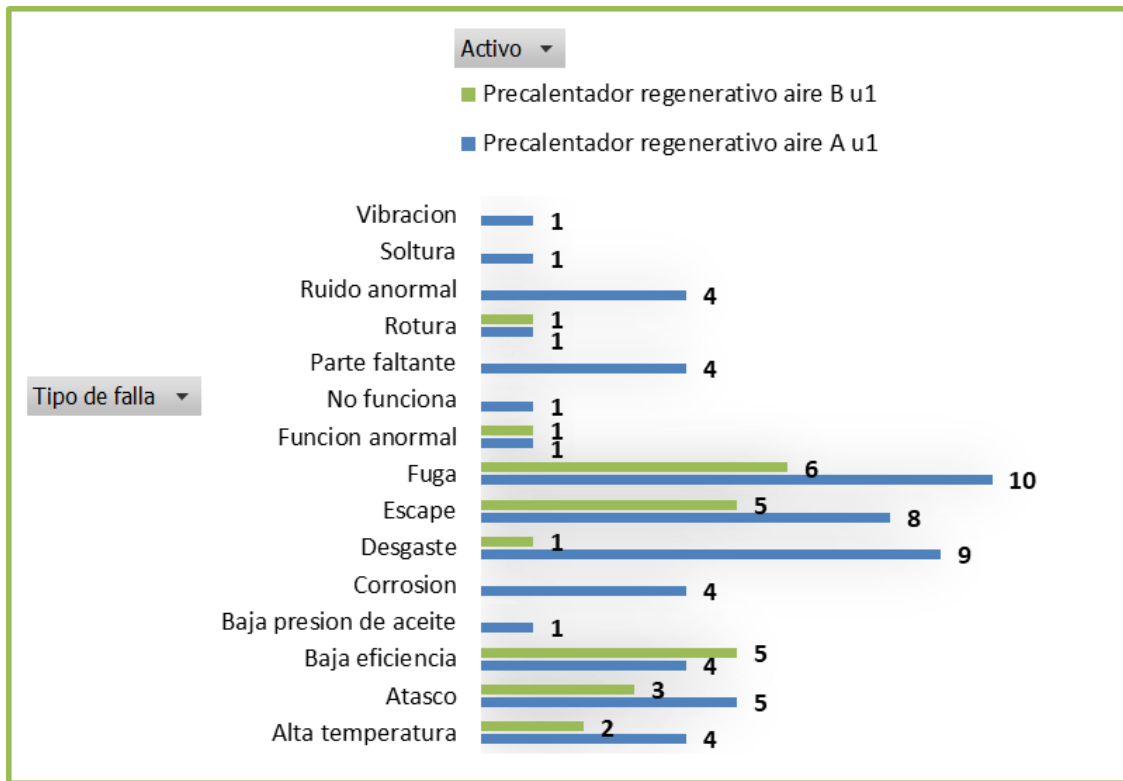
5.4.1 Modos de falla. Se relacionan los modos de falla de los precalentadores A y B, especificando la cantidad de eventos presentados en cada uno de ellos.

Tabla 3. Historial de modos de falla

Tipos de falla	Precalentador aire regenerativo A u1	Precalentador aire regenerativo B u1	Total, general
Alta temperatura	4	2	6
Atasco	5	3	8
Baja eficiencia	4	5	9
Baja presión de aceite	1	0	1
Corrosión	4	0	4
Desgaste	9	1	10
Escape	8	5	13
Fuga	10	6	16
Función anormal	1	1	2
No funciona	1	0	1
Parte faltante	4	0	4
Rotura	1	1	2
Ruido anormal	4	0	4
Soltura	1	0	1
Vibración	1	0	1
Total, general	58	24	82

Fuente: Software de mantenimiento “Main saver” de Gecelca SA ESP

Figura 9. Representación gráfica de los modos de falla



Fuente: Software de mantenimiento "Main saver" de Gecelca SA ESP

5.4.2 Fallas por componente. Historial de eventos presentados en los componentes de los precalentadores.

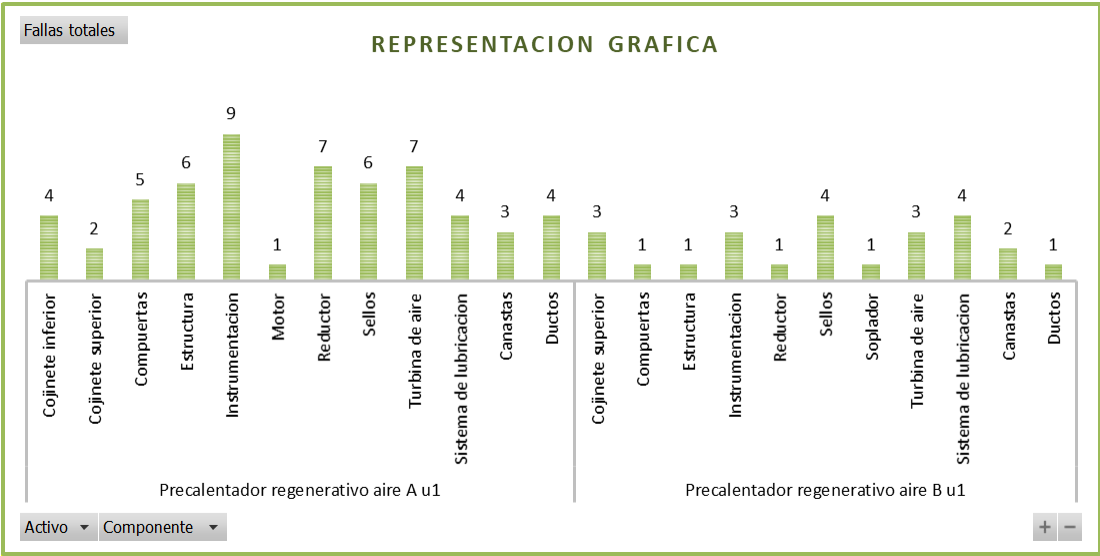
Tabla 4. Fallas totales por componente.

Componente	Fallas totales	% Falla
Precalentador regenerativo aire A u1	58	100%
Cojinete inferior	4	7%
Cojinete superior	2	3%
Compuertas	5	9%
Estructura	6	10%
Instrumentación	9	16%
Motor	1	2%
Reductor	7	12%
Sellos	6	10%
Turbina de aire	7	12%
Sistema de lubricación	4	7%
Canastas	3	5%
Ductos	4	7%
Precalentador regenerativo aire B u1	24	100%
Cojinete superior	3	13%
Compuertas	1	4%
Estructura	1	4%
Instrumentación	3	13%
Reductor	1	4%
Sellos	4	17%
Soplador	1	4%
Turbina de aire	3	13%
Sistema de lubricación	4	17%
Canastas	2	8%
Ductos	1	4%
Total, general	82	

Fuente: Software de mantenimiento “Main saver” de Gecelca SA ESP

El sistema de transmisión del precalentador está conformado por motor, acople hidráulico, reductor y turbina de aire, en la tabla se analizaron por separado para cuantificar mejor las fallas presentadas.

Figura 10. Representación gráfica de fallas por componentes



Fuente: Software de mantenimiento “Main saver” de Gecelca SA ESP

Tabla 5. Promedio anual de fallas en los Precalentadores

Componentes	2000	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Total	PROMEDIO
Precalentador regenerativo aire A u1	8	7	4		2	3	5	2	6	5	4	1	1	4	4	2	58	3,63
Cojinete inferior						3								1			4	0,25
Cojinete superior													1	1			2	0,13
Compuestas	3	1					1			1							5	0,31
Estructura			1		1		1		1	1					1		6	0,38
Instrumentacion	2	1	1		1				1					1	1	1	9	0,56
Motor												1					1	0,06
Reductor	2	1					1			1	1					1	7	0,44
Sellos								2	1		2			1			6	0,38
Turbina de aire		1					2		2	1					1		7	0,44
Sistema de lubricacion	1	1	1							1							4	0,25
Canastas			1								1				1		3	0,19
Ductos		2							1	1							4	0,25
Precalentador regenerativo aire B u1	3	2	1	3		1	5	2	1		2		1	1	2		24	1,50
Cojinete superior						1	1						1				3	0,19
Compuestas	1																1	0,06
Estructura							1										1	0,06
Instrumentacion	1						1								1		3	0,19
Reductor				1													1	0,06
Sellos								1			2			1			4	0,25
Soplador		1															1	0,06
Turbina de aire		1					1	1									3	0,19
Sistema de lubricacion	1			1			1		1								4	0,25
Canastas			1												1		2	0,13
Ductos				1													1	0,06
Total general	11	9	5	3	2	4	10	4	7	5	6	1	2	5	6	2	82	5,13

Fuente: Software de mantenimiento "Main saver" de Gecelca SA ESP

6 ANALISIS DE MODO DE FALLAS, EFECTOS Y CRITICIDAD

Es también conocido como FMECA y consiste en un método que permite cuantificar las consecuencias o impacto de las fallas de los componentes de un sistema, y la frecuencia con que se presentan para establecer tareas de mantenimiento en aquellas áreas que están generando mayor repercusión en la funcionalidad, confiabilidad, mantenibilidad, riesgos y costos totales, con el fin de mitigarlas o eliminarlas por completo.

El FMECA consta de varias etapas:

1. Definición de la intención de diseño
2. Análisis funcional
3. Identificación de modos de falla, efectos de la falla
4. Criticidad o jerarquización del riesgo
5. Recomendaciones y métodos de prevención.

AGULAR OTERO, José; TORRES ARCIQUE, Rocío y MAGAÑA JIMÉNEZ, Diana¹⁹, explican que con la aplicación del FMECA se identifican los modos de falla que representan un mayor riesgo, considerando los riesgos a la producción, instalación y al personal. Los modos de falla de mayor riesgo, son enviados a un proceso de selección de tareas de mantenimiento detallado, mientras que los modos de falla de medio y bajo riesgo, son tratados con un proceso genérico. Esto permite identificar las áreas donde el mantenimiento tendrá una mejor oportunidad para impactar la seguridad y confiabilidad de la instalación. También de optimizar los recursos ya que la planeación del mantenimiento cambia al ser ahora enfocada en los modos de falla derivados de un análisis funcional y no enfocada en los equipos, es decir, el plan es por modo de falla y no por equipo.

¹⁹ AGULAR OTERO, Jose; TORRES ARCIQUE, Rocío y MAGAÑA JIMÉNEZ, Diana. Análisis de modos de falla, efectos y criticidad para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. Tecno. Ciencia Ed. (IMIQ) 25(1): 15-26, 2010

FMECA no se trata de cambiar la forma en la que se hace el mantenimiento, sino la forma en la que este se planea. Mejores estrategias darán mejores programas y, por lo tanto, mejor mantenimiento, uno óptimo, lo que se espera redunde en un mejor rendimiento de los activos y mayor seguridad.

6.1 DEFINICION DE LA INTENCION DE DISEÑO

Consiste en conocer la función de la planta o proceso, con el fin de identificar las condiciones de operación, teniendo en cuenta el diseño y las necesidades del usuario.

La definición deberá de contener parámetros de operación, los equipos involucrados, rutas de proceso, parámetros de control, entre otros atributos.

Para el análisis de modos de falla y sus efectos, la definición de la intención de diseño es recomendable, ya que para entender como falla un activo, primero es necesario conocer cómo opera.

6.2 ANALISIS FUNCIONAL

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

El análisis funcional es necesario para poder entrar al proceso de evaluación de los modos de falla, ya que se requiere conocer e identificar cuáles son aquellas funciones que el usuario espera o desea que su activo desempeñe. Se requiere identificar tanto la función principal como las secundarias.

- **Función principal:** 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.

6.3 IDENTIFICACIÓN DE MODOS DE FALLA

Un modo de falla podemos definirlo como la forma en la que un activo pierde la capacidad de desempeñar su función o, en otras palabras, la forma en que un activo falla. A cada modo de falla le corresponde una acción de mitigación o prevención, dentro del proceso de Administración del Riesgo estas acciones pueden ser orientadas a desviaciones del proceso, factores humanos, etc., o bien, como en este caso, donde el objetivo del FMECA es diseñar un plan de mantenimiento, a cada modo de falla le corresponderá una tarea de mantenimiento.²⁰

6.4 EFECTOS DE LA FALLA

Los efectos de la falla son considerados como la forma en la que la falla se manifiesta, es decir, como se ve perturbado el sistema ante la falla del equipo o activo, ya sea local o en otra parte del sistema, estas manifestaciones pueden ser: aumento / disminución de nivel, mayor / menor temperatura, activación de señales, alarmas o dispositivos de seguridad, entre otras; similarmente, se considera también la sintomatología de la falla, ruido, aumento de vibración, etc.

6.5 CONSECUENCIAS DE LA FALLA

Las consecuencias son evaluadas en términos de ocurrencia, esta se define como la probabilidad de que una causa ocurra y resulte en un modo de falla durante la vida esperada del activo.

²⁰ AGULAR OTERO, Jose; TORRES ARCIQUE, Rocío y MAGAÑA JIMÉNEZ, Diana. Análisis de modos de falla, efectos y criticidad para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. Tecno. Ciencia Ed. (IMIQ) 25(1): 15-26, 2010

Para obtener el valor de la ocurrencia se ha definido una escala del 1 al 10, Cada uno de estos escalones dependerá de la frecuencia de falla que se le ha asignado a cada escalón, si la falla que se encuentra es mayor a cinco años entonces se definió que la probabilidad del incidente es casi nula, si la frecuencia es cada 2 años se define que es bajo, si la frecuencia es diaria se definió como muy alta. En la tabla se muestra la forma como se realiza el criterio de evaluación y clasificación de la ocurrencia, en caso de obtener valores intermedios se asume el superior inmediato, y si se desconociera totalmente la probabilidad de falla se debe asumir una ocurrencia igual a 10.

Tabla 6. Criterios de clasificación para la ocurrencia de los modos de falla

POSIBILIDAD DE FALLA	FRECUENCIA DE FALLAS	NIVEL
Muy alta: La falla es casi inevitable.	Diaria	10
	Semanal	9
Alta: La falla es frecuente, o está asociada a fallas frecuentes en otros procesos.	Mensual	8
	Cada 2 meses	7
Moderado: La falla es ocasional, o está asociada a fallas ocasionales en otros procesos.	Cada 3 meses	6
	Cada 6 meses	5
	Anual	4
Bajo: Falla aislada en el proceso.	Cada 2 años	3
Muy baja: La falla está asociada a fallas aisladas en otros procesos.	Cada 5 años	2
Remota: La falla es improbable.	Mayor a 5 años.	1

6.6 SEVERIDAD DE LA FALLA

El primer paso para analizar un riesgo es cuantificar la severidad de los efectos, para el análisis en estudio se determinó una escala del 1 al 10, siendo el 10 el más severo y el 1 el menos severo.

Para determinar la severidad es necesario tener en cuenta si el modo de falla interrumpe o no la operación, si impacta en la calidad si ocurre con previo aviso o no y muy importante si impacta en la operación segura del equipo, todo esto se representa en la siguiente tabla.

Tabla 7. Criterios de evaluación de la severidad de los efectos

EFEECTO	CRITERIO	NIVEL
Peligroso sin aviso	La falla ocurrirá sin previo aviso. Puede poner en peligro a otros sistemas y/o puede afectar la operación segura del sistema bajo análisis. Se incumple con alguna regulación gubernamental.	10
Peligroso con aviso	La falla ocurrirá con previo aviso. Puede poner en peligro a otros sistemas y/o puede afectar la operación segura del sistema bajo análisis. Se incumple con alguna regulación gubernamental.	9
Muy alto	Falla menor del sistema. Los controles actuales no pueden mantener el sistema operativo y requiere fuerte intervención del operador para su correcto funcionamiento.	8
Alto	Falla menor del sistema. Los controles actuales no pueden mantener el sistema operativo y requiere moderada intervención del operador para su correcto funcionamiento.	7
Moderadamente alto	Falla menor del sistema. Los controles actuales no pueden mantener el sistema operativo y requiere ligera intervención del operador para su correcto funcionamiento.	6
Moderado	Falla menor del sistema. Los controles actuales pueden mantener el sistema operativo pero requiere fuerte intervención del operador para su correcto funcionamiento.	5
Bajo	Falla menor del sistema. Los controles actuales pueden mantener el sistema operativo pero requiere moderada intervención del operador para su correcto funcionamiento.	4
Muy bajo	Falla menor del sistema. Los controles actuales pueden mantener el sistema operativo pero requiere ligera intervención del operador para su correcto funcionamiento.	3
Menor	Falla menor del sistema. Los controles actuales.	2
Ninguno	La falla no tiene efectos en el sistema.	1

6.7 DETECCION DE FALLAS

Los valores de la detección están asociados a dos tipos de control.

Control tipo 1. Detectar las causas o mecanismos de falla.

Control tipo 2. Detectar subsecuentes modos de falla.

Un valor de detección se asigna a un tipo de control, lo cual representa una habilidad colectiva de detectar causas y modos de falla. Los controles pueden ser agrupados y tratados como un sistema cuando ellos operan independientemente, así cada

control individual aumenta la capacidad de detección global, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 8. Criterio de evaluación y sistema de clasificación para la detección de una causa de falla.

DETECCIÓN	CRITERIO	NIVEL
Incertidumbre total	El control no detecta la causa potencial de la falla ó no hay control.	10
Muy remota	Hay posibilidad muy remota de que el control detecte la causa potencial de la falla.	9
Remota	Hay posibilidad remota de que el control detecte la causa potencial de la falla.	8
Muy baja	Hay una muy baja posibilidad de que el control detecte la causa potencial de la falla.	7
Baja	Hay una baja posibilidad de que el control detecte la causa potencial de la falla.	6
Moderada	Hay una moderada posibilidad de que el control detecte la causa potencial de la falla.	5
Moderadamente alta	Hay una moderadamente alta posibilidad de que el control detecte la causa potencial de la falla.	4
Alta	Hay una alta posibilidad de que el control detecte la causa potencial de la falla.	3
Muy alta	Hay una muy alta posibilidad de que el control detecte la causa potencial de la falla.	2
Casi certeza total	El control detecta casi con certeza total la causa.	1

6.8 JERARQUIZACION DEL RIESGO

Nos permite identificar las mejores áreas de oportunidad para las acciones de recomendación, tanto en la etapa de evaluación como en la aplicación de los recursos económicos y humanos.

Para aplicar el proceso de selección de tareas de mantenimiento en un mayor detalle, se requiere de los modos de falla resultantes, especialmente de aquellos críticos por su nivel de riesgo, para esos se empleará el RCM.

A los modos de falla resultantes de riesgo medio se les debe aplicar la estrategia derivada del análisis criticidad, modos de falla y sus efectos, FMECA; mientras que los modos de falla de bajo riesgo, son elegibles para continuar aplicando las acciones que actualmente se vienen aplicando, dado que el riesgo a administrar es mínimo.

6.9 ANALISIS DE CRITICIDAD

El sistema de aire y gases combustión de la central de generación #1 de Termoguajira cuenta con dos Precalentadores de aire regenerativo. A continuación, se relacionan los componentes que lo conforman.

Tabla 9. Componentes del Precalentador de aire regenerativo A y B u1

COMPONENTES DE LOS PRECALENTADORES
Estructura
Eje rotor
Cojinete Superior
Cojinete inferior
Canastas
Sellos
Motor eléctrico
Reductor
Ductos
Compuertas
Turbina de aire
Sistema de lubricación
Instrumento de control
Sopladores

6.9.1 Desarrollo del análisis. Para el desarrollo del análisis se extrajo del software “MainSaver” la información correspondiente a número de fallas, tiempo de reparación (TTR), se calculó el tiempo promedio para reparar (MTTR) y los costos asociados al mantenimiento por consecuencia de las fallas presentadas desde el año 2000 hasta el año 2016.

Tabla 10. Información de costos y tiempos de reparación.

Activo	No. Fallas	Costo Total	Tiempo de reparación (TTR) (hr)	Tiempo promedio para reparar (MTTR) (hr)	Promedio de Falla por Año
Precalentador A u1	58	\$ 34.402.049	242	4,17	3,41
Precalentador B u1	24	\$ 14.429.912	102	4,25	1,41
Total	82	\$ 48.831.961	344	4,20	4,82

Fuente: Software de mantenimiento “Main saver” de Gecelca SA ESP

Para efectos de estudio la metodología a utilizar será basada en la teoría del riesgo, la cual generará los resultados semicuantitativos.

*Riesgo = frecuencia * consecuencia.*

Frecuencia = número de fallas en un tiempo determinado.

*Consecuencia = (impacto operacional * flexibilidad * TPPR) + costo de mantenimiento + impacto ambiental.*

En la siguiente tabla se exponen los criterios de evaluación para la elaboración del análisis.

Tabla 11. Criterios de evaluación.

ITEM	CRITERIOS	PUNTAJE
1	Frecuencia de Falla (FF)	
	Menos de 1 Falla por año	1
	Entre 1 y 6 fallas por año	2
	Entre 6 y 12 fallas por año	3
	Entre 12 y 52 fallas por año	4
	Mayor a 52 fallas por año	6
2	Impacto Operacional (IO)	
	Parada total del equipo	10
	Parada del subsistema y tiene repercusión sobre otros	7
	Impacta en niveles de calidad	4
	No genera ningún efecto significativo	1
3	Flexibilidad (IF)	
	No existe equipo o repuesto de reemplazo	4
	Hay opción de repuesto en almacén	2
	Existe opción de operación	1
4	Tiempo promedio para reparar MTTR	
	Menos de 3 horas	1
	Entre 3 y 8 horas	2
	Entre 8 y 24 horas	4
	Mas de 24 horas	6
5	Costo de mantenimiento (CM)	
	Menos de 2 SMMLV	2
	Entre 2 y 20 SMMLV	5
	Más de 20 SMMLV	10
6	Impacto en seguridad	
	Afecta seguridad humana	8
	Afecta instalaciones causando daños severos	5
	Provoca daños menores	3
	No provoca daños a personas o instalaciones	0
7	Impacto ambiental	
	Si	7
	No	0

Fuente: Software de mantenimiento “Main saver” de Gecelca SA ESP

6.9.2 Resultados del análisis de criticidad. En la siguiente tabla se muestran los resultados de análisis, para ello se determinaron los siguientes niveles de criticidad.

- $X > 120$, es un equipo crítico. (Rojo)
- $44 \leq X \leq 120$, es un equipo semicrítico. (Amarillo)
- $X < 42$, es un equipo no crítico. (Verde)

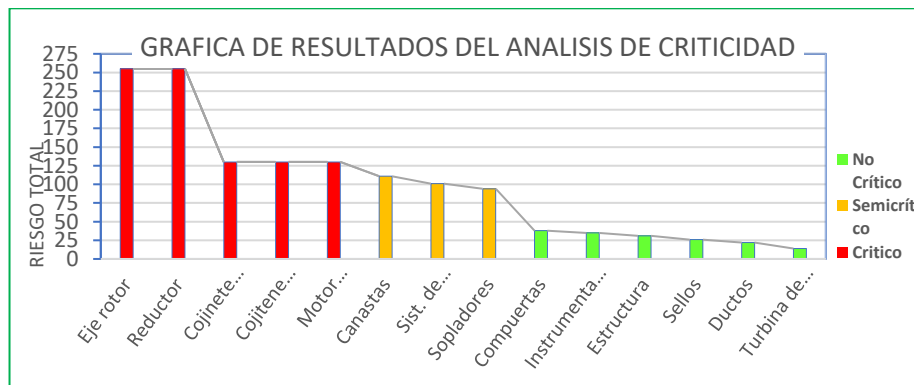
Tabla 12. Resultados de análisis de criticidad

COMPONENTE	FRECUENCIA	IMPACTO OPERACIONAL	FLEXIBILIDAD	TIEMPO PARA REPARAR	COSTOS DE MTTO	IMPACTO SEGURIDAD	IMPACTO AMBIENTAL	CONSECUENCIAS	RIESGO TOTAL	CRITERIO
Estructura	1	1	1	6	10	8	7	31	31	NC
Eje rotor	1	10	4	6	10	5	0	255	255	C
Cojinete Superior	1	10	2	6	5	5	0	130	130	C
Cojitene inferior	1	10	2	6	5	5	0	130	130	C
Canastas	1	4	4	6	10	5	0	111	111	SC
Sellos	1	4	2	2	5	5	0	26	26	NC
Motor electrico	1	10	2	6	5	5	0	130	130	C
Reductor	1	10	4	6	10	5	0	255	255	C
Ductos	1	1	1	2	5	8	7	22	22	NC
Compuertas	1	7	2	2	5	5	0	38	38	NC
Turbina de aire	1	1	2	2	5	5	0	14	14	NC
Sist. de lubricacion	1	7	2	6	5	5	7	101	101	SC
Instrumentacion	1	7	2	2	2	5	0	35	35	NC
Sopladores	1	7	2	6	5	5	0	94	94	SC

Fuente: Software de mantenimiento “Main saver” de Gecelca SA ESP

La figura 3 muestra el diagrama de barras correspondiente a los resultados obtenidos en la tabla 12, indicando las tres zonas que caracterizan el análisis de criticidad realizado al precalentador de aire regenerativo.

Figura 11. Diagrama de barras, resultado del análisis de criticidad



6.10 FMEA PRECALENTADOR DE AIRE

Tabla 13. Análisis de modos de fallas y efectos.

COD.	FUNCIÓN	COD.2	FALLA FUNCIONAL	COD.3	MODO DE FALLA	EFFECTO DE LA FALLA
F		FF		MF		
1	Aumentar temperatura del aire a no menos de 345°C	1A	No eleva la temperatura del aire	1A1	Motor en corto	Se detiene el equipo, la unidad trabaja a media capacidad de generación
				1A2	Reductor con componentes partidos	Se detiene el equipo, la unidad trabaja a media capacidad de generación
				1A3	Acople hidráulico averiado	Se detiene el equipo, la unidad trabaja a media capacidad de generación, posible fuga de aceite
				1A4	Cojinetes partidos	Se detiene el equipo, produce roce interno del rotor con la estructura, daña los sellos, puede causar daño en el eje, fuga de aceite.
				1A5	Bajo nivel de aceite	Alta temperaturas, alarma en sala de mando, puede producir desgaste y roce interno en cojinete.
		1B	Aumenta la temperatura del aire a menos de 345°C	1B1	Canastas saturadas	Bajo flujo de gases que impide el calentamiento requerido del aire.

				1B2	Sellos desgastados	Atasco interno del rotor, baja eficiencia en la combustión, escape de aire por chimenea.
				1B3	Sellos descalibrados	Baja eficiencia en la combustión, escape de aire por chimenea.
				1B4	Compuertas averiadas	Restricción del flujo lo cual hace ineficiente el proceso
2	Mantener los flujos de aire y gas separados con un porcentaje de fuga permisible del 7.71 %	2A	Pase entre el lado frio y lado caliente	2A1	Sellos descalibrados	Baja eficiencia en la combustión, escape de aire por chimenea.
				2A2	Sellos desgastados	Baja eficiencia en la combustión, escape de aire por chimenea.
				2A3	Canastas deterioradas	Contaminación por desprendimiento de material corrosivo, se obstruyen las canastas y baja se pierde eficiencia.
3	Contener el 100% del aire y los gases en el equipo.	3A	Pérdida de contención	3A1	Rotura en estructura	Escape, puede ocurrir incidente, posible parada del equipo, contaminación ambiental
				3A2	Rotura en ductos	Escape, puede ocurrir incidente, contaminación ambiental

7 IDENTIFICACION DE COMPONENTES A LOS CUALES SE LES APLICARA LA METODOLOGÍA RCM

Tabla 14. Selección de metodología de mantenimiento.

ITEM	COMPONENTE	CRITICIDAD	METODOLOGIA	JUSTIFICACIÓN
1	Rotor	Crítico	Mantenimiento Centrado en Confiabilidad - RCM	En el análisis realizado se determinó el máximo nivel de criticidad en estos sistemas y componentes por lo cual es necesario realizar un plan de mantenimiento más específico. El RCM nos ayudara a mejorar en temas de Calidad aumentando la disponibilidad de la unidad, Tiempo de servicio disminuyendo las paradas no programadas, Costos alargando la vida de los equipos, Tiempo reduciendo la duración de las paradas de planta y Riesgo aumentando la seguridad e integridad de las personas y el medio ambiente.
2	Sistema de transmisión			
3	Cojinetes			
6	Canastas / Sellos	Semi crítico	Mantenimiento Preventivo	Su enfoque es la prevención y reducción del índice de frecuencia de fallas comunes y prematuras mitigando sus consecuencias, este contrarresta las causas conocidas de fallas potenciales en las instalaciones, equipos o sistemas de los equipos en este caso. Su principio de funcionamiento se basa en el cambio de partes en un tiempo determinado sin importar el estado actual del mismo, por lo tanto, una buena planeación proporciona el aviso de falla inminente para así realizar una reparación planeada y reducir el costo global en la administración de activos.
7	Sistema de lubricación			
8	Sopladores			
9	Compuertas	No Critico	Mantenimiento Preventivo	
10	Instrumentación			
11	Estructura			
13	Ductos			

8 DIAGRAMA DE DECISIÓN RCM

Una vez realizado el análisis de modos de fallos y efectos (FMEA), se procede a la evaluación de consecuencias de cada modo de falla. Para lo cual se emplea el diagrama de decisión que nos indicara adecuadamente la respuesta a la pregunta cinco del proceso RCM ¿En qué sentido es importante cada falla?

El diagrama se trata de una representación gráfica que muestra las fallas y las clasifica con una letra representativa dependiendo del tipo, de la siguiente manera; Ocultas y evidentes (H), que indican convenientemente el tipo de tarea, o tareas, a desarrollar en función de las consecuencias del fallo que se analiza. Establece cuatro tipos de consecuencias y según el orden de importancia son: para la seguridad (S), el medio ambiente (E), operacionales (O) y no operacionales (N).

Según el tipo de consecuencia predominante para un modo de fallo analizado, ya sea oculto o evidente, se intentará dar respuesta a una serie de interrogantes codificadas con la letra que identifica el tipo de consecuencia (o fallo para el caso de fallos ocultos), más un número de orden consecutivo. Por ejemplo, S3 es la interrogante 3 cuando se trata de un fallo con consecuencias predominantes para la seguridad.

El diagrama no puede decidir la posibilidad de proponer una tarea, dado que no aporta los criterios para la evaluación y selección de una posible tarea para atender un modo de fallo considerado. Para ello, es necesario valerse de los requisitos que hacen posible determinar que la tarea se puede considerar apropiada.

A continuación, se representa gráficamente el diagrama de decisión de la metodología RCM ilustrado en el libro de RCM de Moubray.

H ¿Será evidente a los operarios la pérdida de función causada por este modo de falla actuando por sí solo en circunstancias normales?

- Sí:** **S** ¿Produce este modo de falla una pérdida de función u otros daños que pudieran lesionar o matar a alguien?
 - Sí:** **E** ¿Produce este modo de falla una pérdida de función u otros daños que pudieran infringir cualquier normativa o reglamento del medio ambiente?
 - Sí:** **S1** ¿Es técnicamente factible, y merece la pena realizar, una tarea a condición?
 - Sí:** Tarea a condición
 - No:** **S2** ¿Es técnicamente factible, y merece la pena realizar, una tarea de reacondicionamiento cíclico?
 - Sí:** Tarea de reacondicionamiento cíclico
 - No:** **S3** ¿Es técnicamente factible, y merece la pena realizar, una tarea de sustitución cíclica?
 - Sí:** Tarea de sustitución cíclica
 - No:** **S4** ¿Es técnicamente factible, y merece la pena realizar, una combinación de tareas?
 - Sí:** Hacer la combinación de tareas
 - No:** El rediseño es obligatorio
 - No:** **S2** ¿Es técnicamente factible, y merece la pena realizar, una tarea de reacondicionamiento cíclico?
 - Sí:** Tarea de reacondicionamiento cíclico
 - No:** **S3** ¿Es técnicamente factible, y merece la pena realizar, una tarea de sustitución cíclica?
 - Sí:** Tarea de sustitución cíclica
 - No:** **S4** ¿Es técnicamente factible, y merece la pena realizar, una combinación de tareas?
 - Sí:** Hacer la combinación de tareas
 - No:** El rediseño es obligatorio
 - No:** **H1** ¿Es técnicamente factible, y merece la pena realizar, una tarea a condición?
 - Sí:** Tarea a condición
 - No:** **H2** ¿Es técnicamente factible, y merece la pena realizar, una tarea de reacondicionamiento cíclico?
 - Sí:** Tarea de reacondicionamiento cíclico
 - No:** **H3** ¿Es técnicamente factible, y merece la pena realizar, una tarea de sustitución cíclica?
 - Sí:** Tarea de sustitución cíclica
 - No:** **H4** ¿Es técnicamente factible, y merece la pena realizar, una tarea de búsqueda de fallas?
 - Sí:** Tarea de búsqueda de fallas
 - No:** **H5** ¿Podría la falla múltiple afectar a la seguridad o al medio ambiente?
 - Sí:** El rediseño es obligatorio
 - No:** Ningún mantenimiento programado

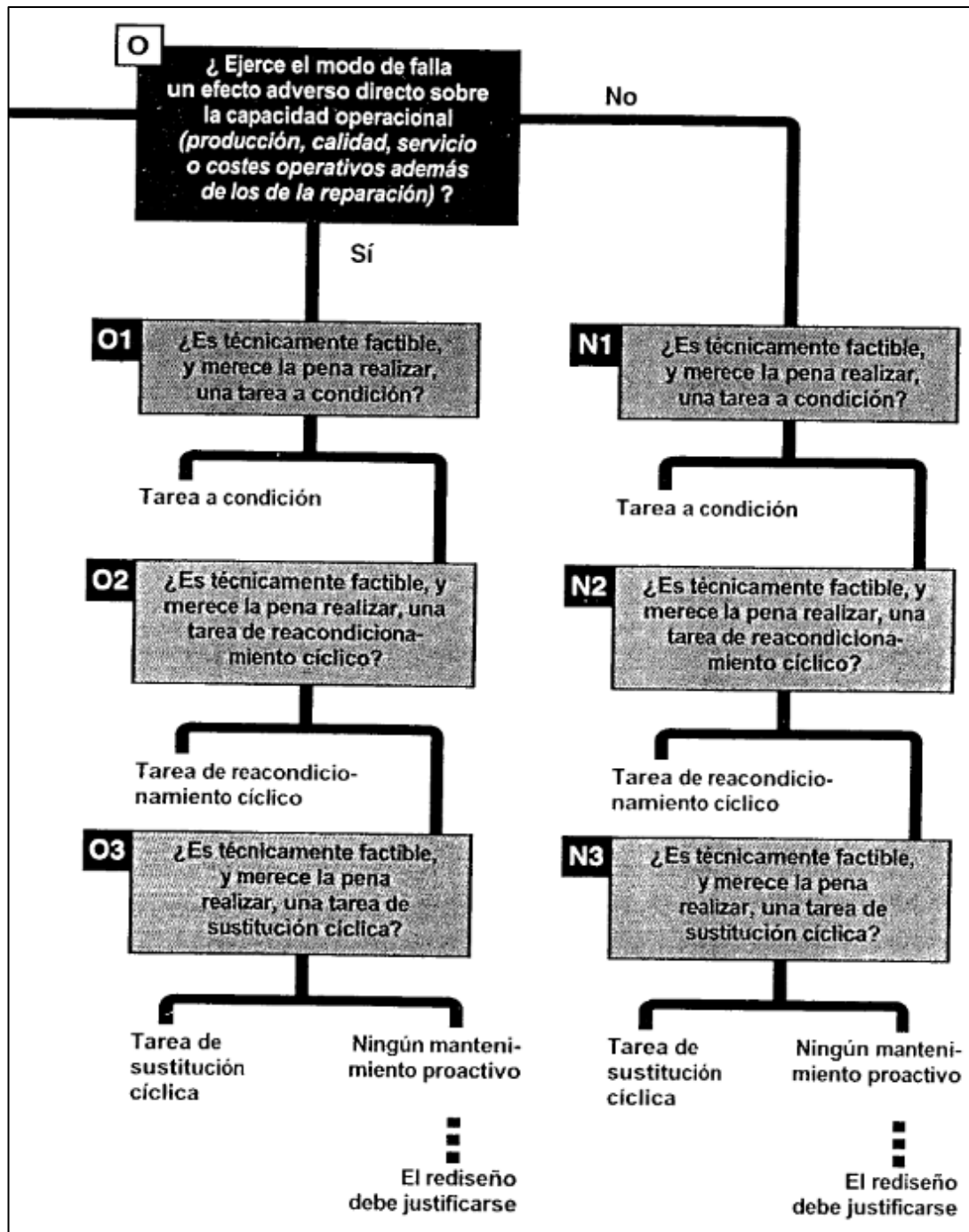
El rediseño es obligatorio

Ningún mantenimiento programado

El rediseño debe justificarse

65

Figura 13. Diagrama de decisión RCM (continuación)



Fuente: MOUBRAY, Jhon. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, Biddles Ltda., Gran Bretaña 2004. 204 p. ISBN: 09539603-2-3.

8.1 HOJA DE DECISION RCM

Moubray en su libro RCM II explica que el contenido de la hoja de decisión permite dar respuesta a las preguntas realizadas en el Diagrama de decisión, y de acuerdo a esas respuestas se debe establecer el tipo de mantenimiento o rutina que será realizado, su frecuencia, responsable, e identifica las fallas críticas por si se necesita realizar otro diseño del equipo.²¹

- Las primeras diez columnas de la Hoja de Decisión se refieren a las preguntas del diagrama de decisión de RCM:
- Las columnas H, S, E, O y N, son utilizadas para dar respuestas a preguntas sobre las consecuencias de cada modo de falla.
- La columna H1/S1/O1/N1, se utiliza para determinar si encontró una tarea para anticipar el modo de falla y prevenir las consecuencias.
- La columna H2/S2/O2/N2, se utiliza para determinar si se encontró tarea de reacondicionamiento cíclico apropiada para prevenir las fallas.
- La columna H3/S3/O3/N3, se utiliza para determinar si se pudo encontrar una tarea de sustitución cíclica para prevenir las fallas.
- Las columnas H4 y H5, o la S4 responden a las preguntas “a falta de”.
- Las últimas tres columnas indican la tarea que ha sido seleccionada, y los recursos necesarios para cumplirla.

²¹ MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. México: Aladon, 2004. Pág. 202-206

Tabla 15. Hoja de decisión RCM del precalentador de aire.

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1	H2 S2 O2	H3 S3 O3	Acción a Falta de			Tarea propuesta	Intervalo inicial	A realizarse por
F	FF	MF	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4			
1	A	1	S	N	N	S	S						Inspección de los parámetros de funcionamiento del motor	trimestral	técnico electricista
1	A	2	S	N	N	S	S						Realizar análisis de vibraciones del conjunto.	mensual	Técnico especialista
1	A	3	S	N	N	S	S						Inspección visual, limpieza externa, verificación de estado y nivel de aceite.	Semanal	Operador
1	A	4	S	N	N	S	S						Verificación de estado y nivel de aceite / Realizar análisis de vibraciones,	Semanal / Mensual	Operador / técnico especialista
1	A	5	S	N	N	S	S						Inspección nivel de aceite	Diaria	Operador
1	B	1	N	N	N	S	S						Lavado interno de canastas con agua a presión.	anual	Técnico mecánico

1	B	2	N	N	N	S	S		Inspección visual	trimestral	Técnico mecánico
1	B	3	N	N	N	S	S		Calibración de sellos	mensual	Técnico mecánico
1	B	4	N	N	N	S	S		Inspección visual de estado, apertura y cierre de compuertas	mensual	Técnico mecánico

Tabla 15. Hoja de decisión RCM del precalentador de aire (Continuación)

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	N	N	N	S	S						Calibración de sellos	mensual	Técnico mecánico
2	A	2	N	N	N	S	S						Inspección visual	trimestral	Técnico mecánico
2	A	3	N	N	N	S	N	N	S			S	Reacondicionamiento de las canastas y cambio de sellos del rotor en Overhaul	4 años	Técnicos Mecánicos
3	A	1	S	S	N	S	S						Inspección visual estado estructura	mensual	Operador
3	A	2	S	S	N	S	S						Inspección visual estado ductos	mensual	Operador

9 FORMATO DE INSPECCION PREVENTIVA PARA EL PRECALENTADOR DE AIRE REGENERATIVO

En vista de que el equipo está en operación las 24 horas se decide realizar dos formatos de inspección, el que se presenta a continuación es una inspección preventiva con frecuencia diaria que estará a cargo del operador de turno de la caldera. Se establecen rutinas de verificación de de los componentes que pueden presentar síntomas

Figura 13. Formato de inspección preventiva diaria

FORMATO DE INSPECCION PREVENTIVA RESPONDA CADA UNA DE LAS PREGUNTAS Y NOTIFIQUE ALGUNA ANOMALIA			
FRECUENCIA	<u>Diaria</u>	NOMBRE _____	FECHA _____
RESPONSABLE	<u>Operador</u>		
ACCIONES Verificar nivel de aceite en reductor Verificar nivel de aceite en sistema de lubricación de cojinetes Comparar valores mostrados en los instrumentos con los valores requeridos por el equipo. Verificar correcto funcionamiento del sistema de agua de enfriamiento			
INSPECCIONES			RESPUESTA (SI-NO)
1. ¿Se evidencian condiciones de seguridad que puedan ocasionar accidentes?			_____
2. ¿El conjunto motor - reductor presenta ruidos anormales en operación?			_____
3. ¿El conjunto motor - reductor presenta niveles de temperatura elevados en operación?			_____
4. ¿El conjunto motor - reductor presenta vibración anormal en operación?			_____
5. ¿El conjunto motor - bomba de lubricación presentan ruidos anormales en operación?			_____
6. ¿El conjunto motor - bomba de lubricación presentan niveles de temperatura elevados en operación?			_____
7. ¿El conjunto motor - bomba de lubricación presenta vibración anormal en operación?			_____
8. ¿El sentido de giro de la bomba está de acuerdo con las indicaciones del equipo?			_____
En caso de responder "SI" a alguna de las anteriores preguntas se deben corregir inmediatamente y de no ser posible se debe generar una requisición de trabajo.			

El formato trimestral cuenta con acciones de inmediata solución, la intención es que mantenimiento solicite el equipo una vez cada tres meses para realizar inspecciones más específicas, limpieza de componentes, lubricación y realizar análisis predictivo de vibraciones al precalentador.

Figura 14. Formato de inspección preventiva trimestral

FORMATO DE INSPECCION PREVENTIVA		
RESPONDA CADA UNA DE LAS PREGUNTAS Y NOTIFIQUE ALGUNA ANOMALIA		
FRECUENCIA	Trimestral	NOMBRE _____
RESPONSABLE	Técnicos de mantenimiento	FECHA _____
ACCIONES		TECNICO
Verificar estado y nivel de aceite del reductor, completar o cambiar si es necesario		Lubricador
Verificar estado y nivel de aceite en sistema de lubricación de cojinetes, completar o cambiar si es necesario		Lubricador
Realizar limpieza de los filtros del sistema de lubricación		Lubricador
Verificar estado y nivel de aceite del acople hidráulico, completar si es necesario		Lubricador
Destapar soportes de cojinetes, revisar estado de rodamientos, realizar limpieza interna		Lubricador
Tomar medidas de los parámetros requeridos en motores eléctricos del equipo		Electricista
Realizar limpieza y revisión del estado los componentes de los motores eléctricos		Electricista
Realizar limpieza y asegurar el correcto funcionamiento del tablero del equipo en sala de barrajes		Electricista
Realizar limpieza y calibración de los instrumentos de medición		Instrumentista
Realizar limpieza y verificación de los tableros de mando del equipo		Instrumentista
Verificar correcto funcionamiento del sistema de agua de enfriamiento		Mecánico
Destapar manholes y verificar estado de las canastas del rotor		Mecánico
Calibrar los sellos radiales, axiales y circunferenciales del rotor		Mecánico
Revisar funcionamiento del sistema de soplado de las canastas		Mecánico
Realizar análisis de vibraciones al Precalentador		Contratista
INSPECCIONES		RESPUESTA (SI-NO)
1. ¿El cuerpo de la bomba presenta desgaste o corrosión?		_____
2. ¿Los tornillos del acople están en buen estado y completos?		_____
3. ¿La alineación de la bomba y del motor son iguales?		_____
4. ¿Hay fugas de aceite en el reductor de velocidad?		_____
5. ¿La carcasa del reductor de velocidad está partida u oxidada?		_____
6. ¿Todos los tornillos del reductor se encuentran ajustados y en buen estado?		_____
7. ¿Las guardas presentan fisuras, rajaduras, corrosión o están deterioradas?		_____
8. ¿Están en buen estado los pernos de anclaje o sujeción de la base?		_____
10. ¿Existen desbalances en corriente entre fases superiores al 5%?		_____
11. ¿Existen desbalances en tensión entre fases superiores al 3%?		_____
12. ¿El nivel de aislamiento de la acometida del motor al minuto con una tensión de prueba de 500V es superior a 60Mohms?		_____
14. ¿El nivel de aislamiento del motor al minuto con una tensión de prueba de 500V es superior a 100/200Mohms? (motores de menos/más de 10HP respectivamente).		_____
15. ¿Los terminales del motor se encuentran sulfatados?		_____
16. ¿Los terminales del motor cuentan con el largo suficiente?		_____
17. ¿La sujeción de la carcasa del motor a la base presenta roturas?		_____
18. ¿El motor presenta juego axial/radial en el eje?		_____
En caso de responder "SI" a alguna de las anteriores preguntas se deben corregir inmediatamente y de no ser posible generar aviso.		

10 CONCLUSIONES

La información con la cual se realizó este proyecto proviene del software de la compañía y los datos son eventos o fallas reales presentados en el tiempo de operación estudiado, esto permite analizar las estrategias que se deben implementar para mejorar el estado actual del equipo.

Por medio del FMECA se permitió conocer las funciones principales de precalentador para así, conocer las fallas funcionales y el impacto generado por los modos de falla de cada uno de los componentes del sistema, y la frecuencia con que se presentan para establecer las rutinas de mantenimiento que nos indique el diagrama de decisión RCM.

Se identificaron aquellos componentes que están generando mayor repercusión en la funcionalidad, confiabilidad, mantenibilidad, riesgos y costos totales, con el fin establecer formatos de inspección preventiva y tareas que permitan identificar irregularidades antes de que puedan causar fallas que provoquen paradas no planeadas en los equipos y causen indisponibilidades que afectan de forma significativa la rentabilidad de la compañía.

BIBLIOGRAFÍA

BORRAS PINILLA, C. (2017). Especializacion en gerencia de mantenimiento. Clase de Mantenimiento Preventivo. Barranquilla.

DESHPANDE, Vikram S., & MODAK, J. P. (2002). Application of RCM to a medium scale industry. Reliability Engineering and System Safety, 31-34.

DIEZ, Pedro F. (2018). Biblioteca sobre ingenieria energetica. Obtenido de <http://es.pfernandezdiez.es/libro/?id=15>

GECELCA SA ESP. (07 de 05 de 2018). Recuperado el Febrero de 2017, de <https://www.gecelca.com.co/index.php/servicios/servicios-gecelca>

GECELCA SA ESP. (07 de 05 de 2018). Recuperado el Febrero de 2017, de <https://www.gecelca.com.co/index.php/empresa/quienes-somos/mision-y-vision>

KOHAN, Anthony. L. (2000). Manual de Caldera: Principios operativos de mantenimiento, construcción, instalación, reparación, seguridad, requerimientos y normativas. España: McGraw-Hill.

MATA, Daniel; ALLER, Jose M; & BUENO, Alexander. (2008). Análisis probabilístico del mantenimiento predictivo y correctivo de máquinas eléctricas rotativas en una planta trefiladora. SciELO - Scientific electronic library online.

MITSUBISHI - LJUNGSTROM. (s.f.). Manual de instrucciones del precalentador de aire central termoguajira (Vol. 2). La Guajira.

MITSUBISHI. (s.f.). Manual de instalación y mantenimiento. La Guajira.

MOUBRAY, John. (2004). Mantenimiento centrado en confiabilidad II. Aladon Ltd.

S.A., DRISTAL. (s.f.). Manual de entrenamiento Central Termoeléctrica de la Guajira.

SAE, JA1011. (s.f.). A Guide to Reliability-Centered Maintenance (RCM).

SAE, JA1012. (s.f.). Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM).

SEXTO, Luis F. (08 de 11 de 2012). Sostenibilidad y mantenimiento. Obtenido de <https://luisfelipesexto.blogia.com/>

SEXTO, Luis F. La evaluación de tareas en un proceso de mantenimiento centrado en la confiabilidad [en línea]. Enero de 2010. [fecha que secita 08/05/2018].

Disponible en Internet: www.mantenimientomundial.com & blog Sostenibilidad & Mantenimiento <<http://luisfelipesexto.blogia.com>>.