

MODELO DE PLAN DE MANTENIMIENTO, BASADO EN LA METODOLOGÍA RCM,  
PARA UN SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA DE GASES DE  
ESCAPE POR MEDIO DE TURBOGENERADORES, EN PLANTA DE GENERACIÓN  
POR MOTORES A GAS

EDWIN ANDRÉS CORRECHA BRIÑEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO  
YOPAL  
2023

MODELO DE PLAN DE MANTENIMIENTO, BASADO EN LA METODOLOGÍA RCM,  
PARA UN SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA DE GASES DE  
ESCAPE POR MEDIO DE TURBOGENERADORES, EN PLANTA DE GENERACIÓN  
POR MOTORES A GAS

EDWIN ANDRÉS CORRECHA BRIÑEZ

MONOGRAFÍA PARA OPTAR EL TÍTULO DE ESPECIALISTA EN GERENCIA DE  
MANTENIMIENTO

DIRECTOR  
DANIEL ORTIZ PLATA  
MAGISTER EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO  
INGENIERO MECÁNICO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
YOPAL  
2023

## DEDICATORIA

*A mi esposa Natalia por su inagotable amor y apoyo incondicional.*

*A mi hijo Juan Andrés por enseñarme lo que es realmente importante.*

*A mis Padres Alexander e Imelda por enseñarme a nunca rendirme.*

*y a mi tía Yolanda, un angelito que me cuida desde el cielo.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Deseo agradecer a todas las personas que me apoyaron incondicionalmente en este proceso de aprendizaje, investigación y redacción de mi monografía.

En primer lugar, quiero agradecer a mi esposa Natalia por su valioso apoyo en revisión de las normas del documento, así como su interminable paciencia y comprensión en todo este tiempo. Su aporte ha sido fundamental para enfocarme en mi objetivo.

Quiero agradecer al profesor Daniel Ortiz, quien fue mi maestro de RCM en la especialización, y también el director de mi monografía. Sin duda alguna ha realizado un invaluable aporte al desarrollo de esta monografía, mi desarrollo académico y profesional.

## CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS .....	4
LISTA DE TABLAS.....	8
LISTA DE FIGURAS .....	9
LISTA DE ANEXOS .....	10
RESUMEN .....	11
ABSTRACT .....	13
INTRODUCCIÓN .....	15
1     CONTEXTUALIZACIÓN .....	16
1.1 PLANTA DE GENERACIÓN ELECTRICA .....	16
1.1.1 Proceso de generación de la planta termoeléctrica. ....	17
1.1.2 Caracterización de los Turbogeneradores ETC3000. ....	19
1.1.3 Componentes del sistema de turbogeneradores.....	20
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	22
1.3 OBJETIVOS .....	24
1.3.1 Objetivo General .....	24
1.3.2 Objetivos Específicos .....	24
1.4 JUSTIFICACION DEL PROYECTO .....	25
2     MARCO TEORICO .....	26
2.1 COGENERACIÓN ELECTRICA Y RECUPERACIÓN DE GASES DE ESCAPE .....	26
2.1.1 Cogeneración eléctrica .....	27
2.1.2 Recuperación de los gases de escape de un motor a combustión interna .....	28
2.1.3 Disminución del impacto medioambiental por la recuperación de los gases de escape de un motor de combustión interna .....	32
2.2 HISTORIA DE LOS MOTORES A GAS .....	32
2.3 TURBOGENERADORES .....	36

2.4	MANTENIMIENTO INDUSTRIAL .....	38
2.4.1	Historia del Mantenimiento.....	38
2.4.2	Mantenimiento Correctivo.....	41
2.4.3	Mantenimiento Preventivo.....	42
2.4.4	Mantenimiento Predictivo.....	44
2.5	MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD RCM.....	46
2.5.1	Historia del Mantenimiento centrado en confiabilidad RCM.....	46
2.5.2	Metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad RCM. ....	48
3	RECOPILACION DE INFORMACION .....	51
3.1	MANTENIMIENTO ACTUAL AL SISTEMA DE TURBOGENERADORES ..	51
3.2	EQUIPO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.....	52
3.3	ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO ACTUAL DEL SISTEMA.....	52
3.4	REGISTRO DE MANTENIMIENTOS .....	53
3.5	FALLAS OCURRIDAS.....	56
4	TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN .....	58
4.1	DIAGRAMA DE PARETO.....	58
4.2	ANÁLISIS DE CRITICIDAD FALLAS VS CONSECUENCIAS.....	59
5	PROPUESTA DEL MODELO DE PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONFIABILIDAD .....	63
5.1	EQUIPO RCM .....	63
5.2	DEFINICIÓN DE FRONTERAS.....	64
5.3	DEFINICIÓN DE FUNCIONES.....	66
5.4	DEFINICIÓN DE FALLAS FUNCIONALES Y MODOS DE FALLAS.....	67
5.5	EFFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LAS FALLAS .....	68
5.6	ANÁLISIS DE CRITICIDAD.....	69
5.7	SELECCIÓN DE LAS TAREAS y FRECUENCIAS DE MANTENIMIENTO	70
5.8	PLAN DE MANTENIMIENTO PROPUESTO.....	72
5.9	MANTENIMIENTO NO PLANEADO.....	72
5.10	SUGERENCIAS DE REDISEÑO.....	73
5.11	APRENDIZAJE Y RETROALIMENTACIÓN .....	73

5.11.1 Mala definición de la función.....	73
5.11.2 Mala definición de falla funcional .....	74
5.11.3 Definición correcta de los modos de falla.....	74
CONCLUSIONES.....	75
RECOMENDACIONES .....	76
BIBLIOGRAFIA .....	77
ANEXOS .....	80

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Registro de fallas ocurridas .....	56
Tabla 2. Pareto fallas turbogeneradores .....	59
Tabla 3. Tabla frecuencia de fallas para análisis de criticidad .....	60
Tabla 4. Tablas de ponderación para análisis de criticidad .....	61
Tabla 5. Cálculo de criticidad sistema de recuperación de energía .....	62
Tabla 6. Matriz de criticidad.....	62
Tabla 7. Matriz de criticidad taller RCM.....	69

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica Planta de generación .....	16
Figura 2. Planta de generación .....	17
Figura 3. Configuración planta de generación eléctrica .....	18
Figura 4. Turbogenerador y módulo de potencia.....	19
Figura 5. Componentes y configuración de los turbogeneradores. ....	21
Figura 6. Sistema de aprovechamiento de gases de escape con turbogeneradores .....	22
Figura 7. Cogeneración en motores a combustión interna.....	29
Figura 8. Balance energético de un motor 40V12AG .....	31
Figura 9. Ejemplar de motor Lenoir .....	33
Figura 10. Ciclos del motor de 4 tiempo Otto .....	34
Figura 11. Motores a gas en la generación eléctrica.....	36
Figura 12. Partes de un turbogenerador .....	37
Figura 13. Gráfico de la historia del mantenimiento .....	40
Figura 14. Tiempo de la acción preventiva.....	43
Figura 15. Curva PF .....	45
Figura 16. Incidentes y accidentes aéreos registrados por ACRO 1918-2019 .....	46
Figura 17. Organigrama Planta de generación.....	52
Figura 18. Maximo de IBM .....	54
Figura 19. Orden de trabajo en Maximo .....	54
Figura 20. Bitácora de Operaciones y Mantenimiento Eléctrico .....	55
Figura 21. Taxonomía del estudio RCM.....	65
Figura 22. Fronteras en el equipo de recuperación de energía.....	66
Figura 23. Segundo algoritmo de decisión propuesto por la norma SAE JA1012.....	71

## LISTA DE ANEXOS

- Anexo A. Definición de funciones
- Anexo B. Hoja RCM
- Anexo C. Plan de mantenimiento proactivo
- Anexo D. Rediseño deseable
- Anexo E. Mantenimiento no planeado

“Los anexos están adjuntos y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS”

## **RESUMEN**

### **TITULO:**

MODELO DE PLAN DE MANTENIMIENTO, BASADO EN LA METODOLOGÍA RCM, PARA UN SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA DE GASES DE ESCAPE POR MEDIO DE TURBOGENERADORES EN PLANTA DE GENERACIÓN POR MOTORES A GAS

### **AUTOR:**

EDWIN ANDRÉS CORRECHA BRIÑEZ

### **PALABRAS CLAVE:**

TURBOGENERADORES, RCM, MOTORES A GAS, MODO DE FALLA, EFECTOS DE FALLA, MANTENIMIENTO PREVENTIVO, ANALISIS DE CRITICIDAD.

### **CONTENIDO:**

Esta monografía recorre paso a paso el desarrollo de un plan de mantenimiento proactivo basado en la metodología RCM para un sistema de recuperación de energía por medio de turbogeneradores acoplados a un motor de gas natural, realizado como plan de acción debido a las constantes fallas presentadas que afectan de manera importante la disponibilidad del sistema, y pretende la disminución de tiempos de reparación, costos de mantenimiento y una mejora sustancial en la disponibilidad del sistema.

El plan de mantenimiento desarrollado en esta monografía explora en la experiencia de operadores, técnicos de mantenimiento y supervisores de área para obtener como resultado un modelo aterrizado al contexto operacional actual, efectos reales de falla y las dificultades técnicas que se puedan presentar al momento de realizar una tarea de

mantenimiento, con el propósito de eliminar los retrabajos o las tareas que no generan valor a la búsqueda de la confiabilidad.

El plan de mantenimiento basado en confiabilidad entregado al final de esta monografía será un modelo inicial, que deberá ser objeto de la mejora continua por parte del equipo RCM que se asigne en la planta de generación. El éxito de este proceso depende del compromiso e interés del equipo.

---

\*Monografía de grado

\*\*Facultad de ingenierías Físico – Mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Director: Daniel Ortiz Plata

## **ABSTRACT**

### **TITLE:**

MAINTENANCE PLAN MODEL, BASED ON THE RCM METHODOLOGY, FOR A SYSTEM FOR THE USE OF EXHAUST GAS ENERGY BY MEANS OF TURBOGENERATORS IN A GAS ENGINE GENERATION PLANT

### **AUTHOR:**

EDWIN ANDRÉS CORRECHA BRIÑEZ\*\*

### **KEYWORDS:**

TURBOGENERATORS, RCM, GAS ENGINES, FAILURE MODE, FAILURE EFFECTS, PREVENTIVE MAINTENANCE, CRITICALITY ANALYSIS.

### **CONTENTS:**

This monograph goes step by step through the development of a proactive maintenance plan based on the RCM methodology for an energy recovery system by means of turbogenerators coupled to a natural gas engine, carried out as an action plan due to the constant failures presented that significantly affects the availability of the system, and aims to reduce repair times, maintenance costs and a substantial improvement in system availability.

The maintenance plan developed in this monograph explores the operator's experience, technicians' maintenance, and supervisor's area to obtain as a result a model grounded to the current operational context, real effects of failure and the technical difficulties that may arise when performing a maintenance task, with the purpose of eliminating rework or tasks that do not generate value in the search for reliability.

The reliability-based maintenance plan delivered at the end of this monograph will be an initial model, which must be subject to constant work, and continuous improvement by the RCM team assigned to the generation plant. The success of this process depends on the commitment and interest of the team.

---

\*Monograph

\*\*Physical – Mechanical Faculty. Maintenance Management Specialization.

Director: Daniel Ortiz Plata

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad los sistemas de recuperación de energía juegan un papel muy importante en la búsqueda de energía limpias y la descarbonización, por esta razón, los sistemas de turbogeneradores acoplados a motores de gas natural generan un gran interés en la industria moderna, ofreciéndose como una alternativa eficiente y sostenible para la generación eléctrica.

Sin embargo, no están exentos a fallas que limitan su operación y disminuyen la disponibilidad y confiabilidad del sistema, provocando que se incurra en altos costos de mantenimiento y en pérdidas de producción. Por tal motivo, es esencial contar con un plan de mantenimiento que permita garantizar los indicadores de gestión del proceso.

Bajo esta premisa, el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM, por su sigla en inglés) se muestra como una metodología adecuada para el diseño de un plan de mantenimiento proactivo para el sistema de recuperación de energía por medio de turbogeneradores, ya que la metodología está enfocada en la identificación de las funciones principales del sistema y los diferentes modos de falla que se pueden presentar, y al final entregar las tareas de mantenimiento necesarias para maximizar la disponibilidad del sistema y reducir los costos de mantenimiento.

Esta monografía está enfocada en el desarrollo del plan de mantenimiento con la aplicación de modelo RCM para el sistema de recuperación de energía por medio de turbogeneradores acoplados a un motor a gas natural, donde paso a paso se recorrerán y responderán las siete preguntas básicas que propone la norma SAEJA1011 para la correcta aplicación de la metodología.

# 1 CONTEXTUALIZACIÓN

## 1.1 PLANTA DE GENERACIÓN ELECTRICA

Con el ánimo de incrementar la confiabilidad del servicio de energía eléctrica en el departamento de Casanare, en el año 2018 entró en operación la planta de generación eléctrica con capacidad de 58 Mwh. La planta de generación eléctrica está ubicada en el corregimiento del Morro, en Yopal Casanare, la cual, bajo la regulación, se constituye en planta menor al contar con tres módulos de generación interconectados a la red nacional que no superan los 20 Mwh cada uno. En la figura 1 se puede observar la ubicación geográfica de la planta de generación.

Figura 1. Ubicación geográfica Planta de generación



Fuente: Google Maps

### 1.1.1 Proceso de generación de la planta termoeléctrica.

La planta de generación eléctrica cuenta con 3 módulos principales de generación, los cuales albergan 2 motores a gas acoplados a generadores eléctricos cada uno, para un total de 6 motores principales, con capacidad de 9114 Kwh cada uno. Adicional a estos, existen 3 generadores Jenbacher con capacidad de 1025 Kwh cada uno. En la figura 2 se puede apreciar el sistema modular de la planta de generación.

Figura 2. Planta de generación



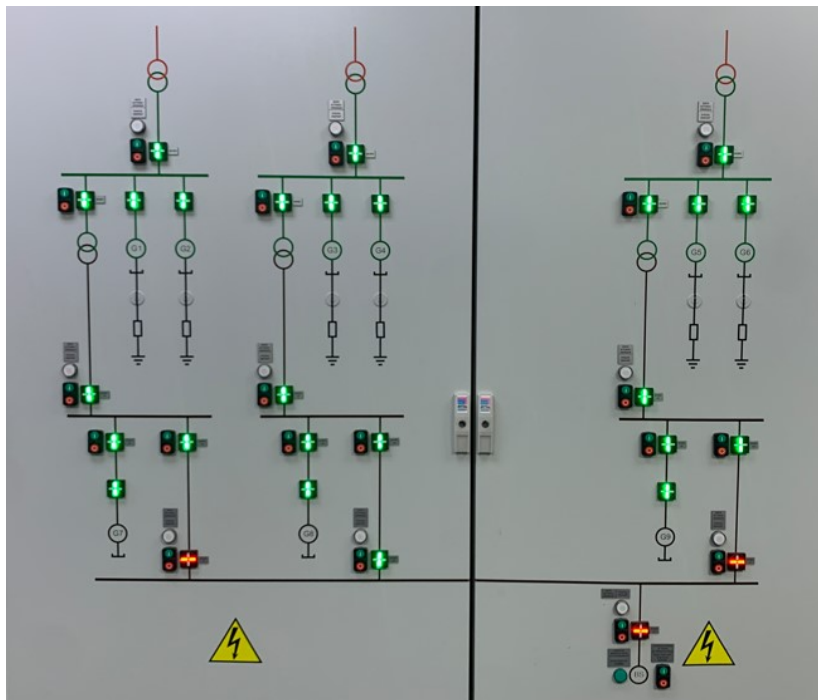
Fuente: [prensalibrecaasanare.com](http://prensalibrecaasanare.com)

Los motores principales son de configuración 20V34SG acoplados a generadores ABB. De manera adicional, cada motor cuenta con un sistema de última tecnología como método de recuperación o cogeneración de energía, los turbogeneradores, correspondientes a un juego de 2 turbinas pequeñas acopladas a generadores con capacidad de 65 Kwh cada uno, para un total de 130 Kwh por motor principal. Estos sistemas reciben aproximadamente un 85% de los gases de escape generados por el

motor y los transforma en energía de manera 100% eficiente para ser entregada al sistema de alimentación de auxiliares a 480 Vac.

La termoeléctrica recibe al día aproximadamente 11 MMFTC (millones de pies cúbicos) de gas natural provenientes del campo Floreña-Ecopetrol, ubicado también en el corregimiento del Morro, los cuales son transformados mediante el proceso de la combustión interna de los motores en potencia mecánica que aprovecha el generador acoplado para transformar a energía eléctrica, logrando entregar en total 58 Mwh a 13.8 Kv. Esta energía eléctrica es recibida por 3 transformadores elevadores principales ubicados en la subestación eléctrica principal, allí la energía es elevada de 13.8 Kv a 115 Kv para posteriormente ser entregada a la red nacional y ser distribuida. En la siguiente figura se puede apreciar la configuración y distribución eléctrica de la planta de generación.

Figura 3. Configuración planta de generación eléctrica



Fuente: Autor

### 1.1.2 Caracterización de los Turbogeneradores ETC3000.

Los turbogeneradores ETC300 son de fabricación inglesa y constan de dos turbinas en paralelo acopladas al eje de generadores magnéticos de alta velocidad. Estas turbinas están instaladas en serie con los turbocompresores de un motor y generan energía eléctrica cuando hay flujo de gases de escape.

La energía eléctrica entregada por los turbogeneradores es controlada por el módulo de potencia electrónica que se encarga de regular la potencia y frecuencia de salida, logrando generar potencia útil y estable para el sistema de 480 Vac a 60 Hz, utilizado en la planta de generación para la alimentación de equipos auxiliares.

Figura 4. Turbogenerador y módulo de potencia



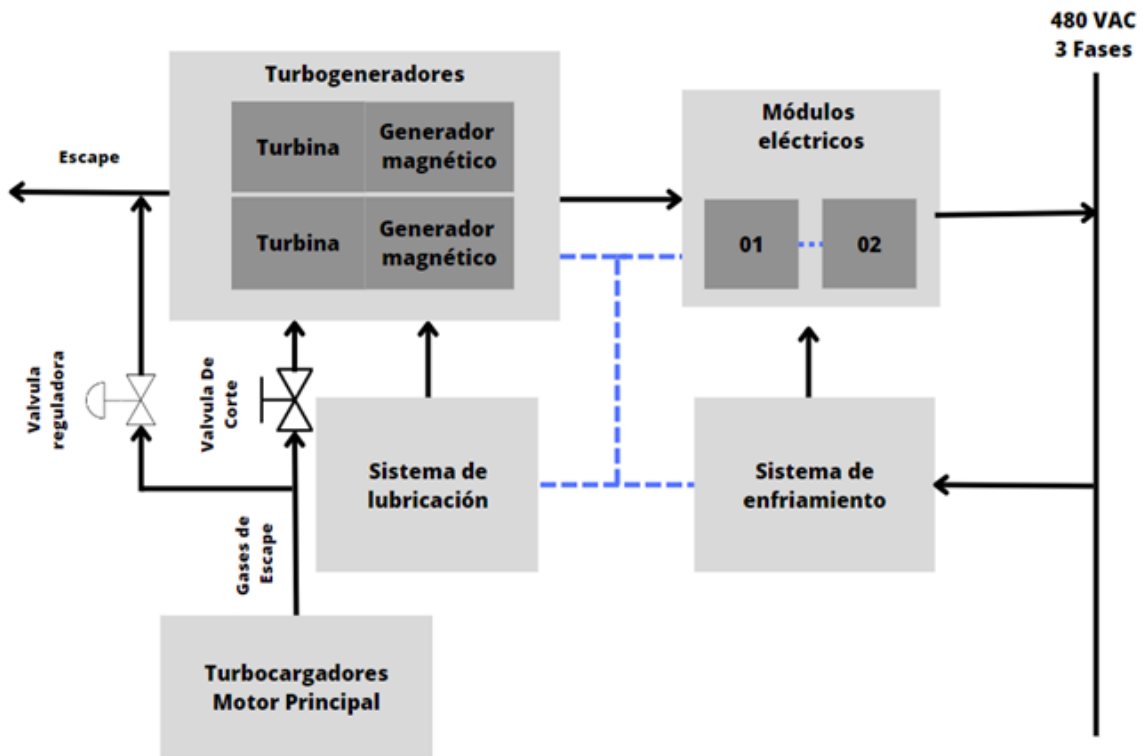
Fuente: Manual turbogeneradores ETC300

- Especificaciones del producto
  - Peso aproximado: 50 Kg
  - Potencia eléctrica mínima: 30 KWe
  - Potencia eléctrica máxima: 70 KWe
  - Velocidad mínima: 49.000 rpm
  - Velocidad máxima: 60.000 rpm
  - Presión entrada de gases mínima: 170 Kpa-abs
  - Presión entrada de gases máxima: 200 Kpa-abs
  - Presión salida de gases: 100 Kpa-abs
  - Aceite utilizado: Mobil SCH-824
  - Temperatura de entrada de aceite Máxima: 65 °C
  - Flujo de aceite mínimo: 12.5 l/min
  - Flujo de aceite máximo: 14.5 l/min
  - Presión de aceite mínima: 140 Kpa Gauge
  - Presión de aceite máxima: 240 Kpa Gauge
  - Temperatura ambiente mínima: -25 °C
  - Temperatura ambiente máxima: 50 °C

### 1.1.3 Componentes del sistema de turbogeneradores.

El sistema de los turbogeneradores ETC300 está compuesto principalmente por la turbina, el generador magnético, el sistema de lubricación, las válvulas de regulación y corte, los módulos de regulación eléctrica y el sistema de enfriamiento. En la siguiente figura se pretende mostrar los principales componentes y función en el sistema.

Figura 5. Componentes y configuración de los turbogeneradores.



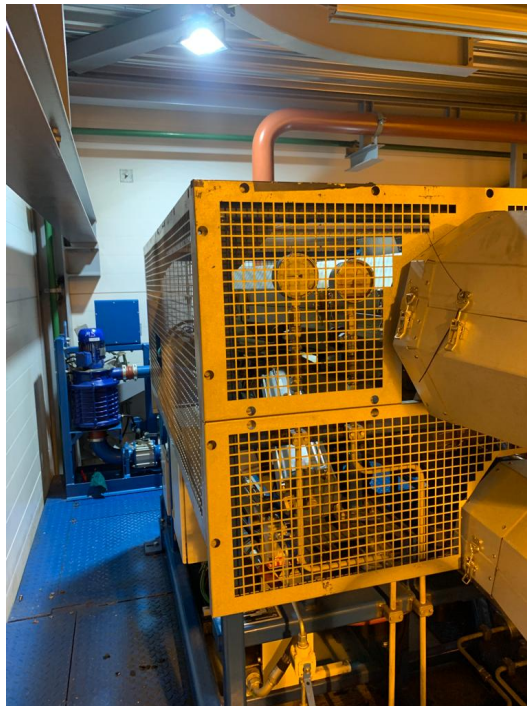
Fuente: Autor

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a frecuentes fallas eléctricas y mecánicas en los turbogeneradores y sus sistemas auxiliares, estos equipos durante los primeros cinco años de operación han presentado una disponibilidad inferior al 60%, lo que representa aproximadamente 22160 Mw de generación eléctrica dejada de entregar al sistema a lo largo de este periodo, y una eficiencia térmica total de la planta que podría ser mejorada.

El equipo de mantenimiento de la planta viene enfocando sus esfuerzos a los sistemas de generación principales, específicamente los motores a gas y sus auxiliares, restando importancia a esta clase de sistemas o equipos pequeños de cogeneración, que recuperan y generan una energía sin necesidad de consumir combustible adicional, lo que los hace muy eficientes.

Figura 6. Sistema de aprovechamiento de gases de escape con turbogeneradores



Fuente: Autor

Con base en lo anterior, se plantea la siguiente hipótesis: ¿Un modelo de mantenimiento basado en confiabilidad ayudaría a elevar la disponibilidad de los turbogeneradores, mejorando así la generación total entregada y la eficiencia térmica total de la planta?

## **1.3 OBJETIVOS**

### 1.3.1 Objetivo General

Diseñar un modelo de plan mantenimiento basado en RCM para el sistema de aprovechamiento de la energía de los gases de escape a partir de turbogeneradores.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar los sistemas principales y secundarios que componen el equipo de recuperación de energía.
- Definir las funciones de los componentes del equipo de cogeneración.
- Determinar las fallas funcionales del equipo y sus posibles modos de falla.
- Proponer un plan de mantenimiento proactivo basado en el análisis de la criticidad los diferentes modos de falla.

## **1.4 JUSTIFICACION DEL PROYECTO**

Las frecuentes fallas en los turbogeneradores asociados al sistema de generación principal como sistema de recuperación conllevan elevados costos de mantenimiento correctivo, tiempo perdido y baja disponibilidad en estos equipos, ocasionando una pérdida económica de aproximadamente 5.900 millones de pesos por oportunidad de generación.

Los diversos modos de falla presentados en los primeros cinco años de operación, asociados con el poco conocimiento específico de estos equipos, han inspirado esta investigación y el propósito de esta monografía es brindar una propuesta de mantenimiento basada en un modelo RCM como solución al problema de confiabilidad en los sistemas de cogeneración en la planta termoeléctrica por motores a gas.

## **2 MARCO TEORICO**

### **2.1 COGENERACIÓN ELECTRICA Y RECUPERACIÓN DE GASES DE ESCAPE**

Historia y marco legal de la cogeneración eléctrica

La cogeneración eléctrica tiene sus raíces en el trabajo desarrollado por el inventor Británico John Barber en el año de 1791, quien fundamentó las bases para la posterior fabricación de la primera turbina a gas, lo que representa el principio de funcionamiento de los actuales motores a gas y turbinas de cogeneración en el mundo.

Otro aporte tecnológico de vital importancia en la historia de la cogeneración eléctrica, sin duda alguna es el generador eléctrico, desarrollado a partir de las bases proporcionadas por Michael Faraday en 1831.

En 1898 se construyó en el hospital militar Beelitz Heilstätten ubicado en Brandeburgo, Alemania, el cual contaba con la primera planta de cogeneración destinada a la generación de energía eléctrica para el complejo hospitalario y la generación de calefacción de los edificios, el principio de funcionamiento se basaba en la generación de vapor por medio de calderas tubulares, para posteriormente generar energía y mover bombas a vapor que desplazaban el agua.

La cogeneración eléctrica en los Estados unidos nace a partir de las crisis petroleras vividas entre la década de 1970, donde la monopolización de las centrales de generación eléctrica, el alto costo de operación y las restricciones en la disponibilidad del combustible, obligaron a incrementar las investigaciones sobre el uso eficiente de la energía, arrojando como resultado leyes regulatorias por parte de gobierno para proteger

las pequeñas generadoras y cogeneradoras, como es descrito por Sosa y Fushimi<sup>1</sup>. En 1978 el presidente Jimmy Carter firma la ley PURPA “Public Utility Regulated Policy Act” como es mencionado por Quispe<sup>2</sup>.

En 1987 Se inicia el desarrollo de la cogeneración en España con la implementación de equipos en la industria papelera, pero hasta 1997 no fue regulado el derecho a una retribución por excedentes entregados a la red de las “instalaciones de producción de energía eléctrica de cogeneración o que utilicen como energía primaria, energías renovables no consumibles” como lo menciona la ley 54/1997 de 27 de noviembre en España. Actualmente está en vigencia la ley 9/2011.

En Colombia fue hasta el año 2014 que la ley 1715 asigna al ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible la facultad de evaluar los requisitos para la expedición de certificado de beneficios ambientales y tributarios a la cogeneración,

### 2.1.1 Cogeneración eléctrica

Lozano y Ramos<sup>3</sup>, definen la cogeneración como “La producción secuencial de electricidad y calor útil a partir del mismo combustible, aporta ahorros energéticos y beneficios económicos, a la vez que reduce el impacto ambiental, por lo que representa una alternativa adecuada de suministro energético”

---

<sup>1</sup> SOSA, Maria Isabel; FUSHIMI, Alberto. La Cogeneración en el contexto de las tecnologías de conversión energética del futuro. La Plata: Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ingeniería, Departamento Mecánica. 2000. 6 pp.

<sup>2</sup> QUISPE, Carlos. Análisis energético de un sistema de cogeneración con ciclo combinado y gasificación para la industria azucarera. Piura: Universidad de Piura. Facultad de ingeniería, Área departamental de ingeniería mecánico-Eléctrica. 2010. P.21.

<sup>3</sup> LOZANO, Miguel ángel; RAMOS, José. Recuperación óptima de calor en sistema de cogeneración con motores de combustión interna. En: VIII Congreso Nacional de Ingeniería Termodinámica. (19,20-21, junio, 2013: Burgos). Libro de Actas. pp. 859-868.

La cogeneración es el proceso de obtención de energía eléctrica o mecánica a partir del aprovechamiento del poder calorífico residual de una maquina térmica, estos sistemas instalados en planta donde su principal producto no es la es energía representan un ahorro interesante en los costos de operación por energía eléctrica, y en planta donde su principal producto si es la generación eléctrica presentan grandes beneficios incrementando la eficiencia térmica de la planta.

La cogeneración se clasifica en dos tipos según el enfoque en la producción de energía y el aprovechamiento del calor residual. Según Cifuentes<sup>4</sup>, si la generación de electricidad produce calor residual que se utiliza para calentar otros procesos industriales, se denomina cogeneración de tipo superior, lo que resulta en producción de energía térmica adicional. Por otro lado, si el calor residual generado durante la producción de energía se utiliza para generar electricidad nuevamente, se denomina cogeneración de tipo inferior.

#### 2.1.2 Recuperación de los gases de escape de un motor a combustión interna

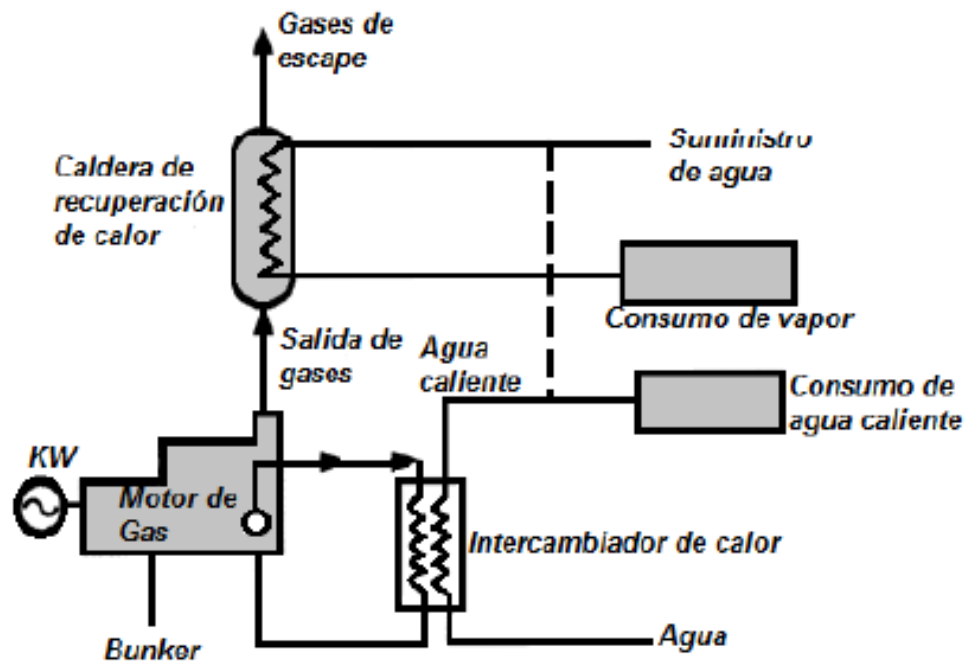
La recuperación energética de los gases de escape de una planta basada en motores de combustión interna representa múltiples beneficios, siendo una forma interesante de reducir las emisiones generadas hasta en un 45% si es por medio de una turbina de vapor de gran capacidad, para esta clase de sistemas hay que tener en cuenta la capacidad de flujo de los gases de escape y el poder calorífico que esto representa, sin embargo para plantas con flujo de gases inferior existen sistemas de recobro como mini turbinas o turbogeneradores de pequeñas capacidades acoplados independientemente a la tubería de escape de cada motor que pueden generar ahorros importantes en los consumos energéticos de las plantas.

---

<sup>4</sup> CIFUENTES, Willy René. Sistema de cogeneración para el ahorro de energía en la industria. Guatemala: Universidad de san Carlos de Guatemala. Facultad de ingeniería.2011. p.38

Según la investigación de Banda y Gutierrez<sup>5</sup>, en ciertos tipos de motores de combustión interna, solo se convierte el 45% de la energía del combustible en energía eléctrica, mientras que el 28% se desperdicia en forma de gases de escape, el 27% restante se emite a través de radiación térmica, que también podría ser aprovechada mediante sistemas de intercambio de calor para el calentamiento de procesos industriales. Ver figura 7.

Figura 7. Cogeneración en motores a combustión interna.



Fuente: Comisión Nacional para el ahorro de energía. México

<sup>5</sup> BANDA, Patricio; GUTIERREZ, Christian. Simulación de un Sistema Recuperador de Calor para Gases de Escape de Motogeneradores a Crudo. En: Revista Técnica "energía". Enero, 2016, No 12, Pp. 230-238. ISSN 1390-5074.

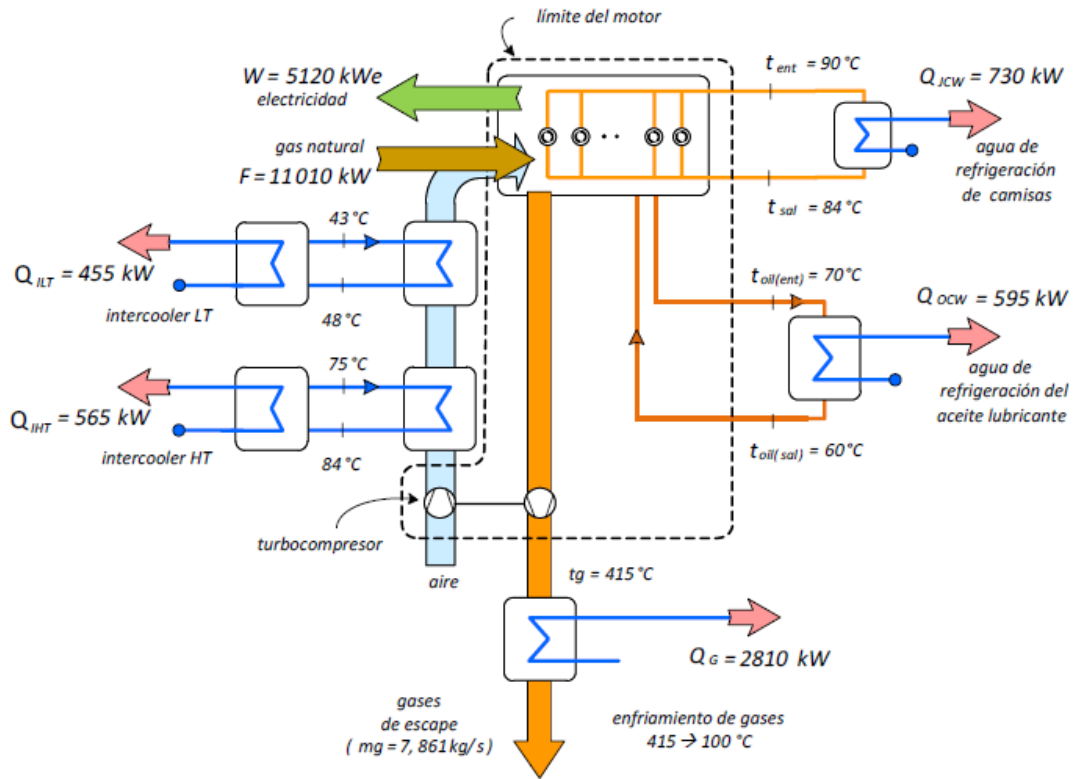
Se estima que, en los motores de combustión interna modernos, una notable porción de la energía del combustible que no se convierte en electricidad se destina a la necesidad mecánica de enfriar componentes, como lo sugiere Lozano y Ramos<sup>6</sup>. Esto proporciona una visión más clara de las posibles fuentes de recuperación de energía en un motor de combustión interna. En su investigación Lozano y Ramos<sup>7</sup> presentan una figura que muestra el balance energético de un motor a gas 40V12AG, donde se observa que específicamente, se tiene la oportunidad de recuperar un 25.52% de la energía térmica del combustible utilizado. Ver figura 8.

---

<sup>6</sup> LOZANO, Miguel ángel; RAMOS, José. Recuperación óptima de calor en sistema de cogeneración con motores de combustión interna. En: VIII Congreso Nacional de Ingeniería Termodinámica. (19,20-21, junio, 2013: Burgos). Libro de Actas. pp. 859-868.

<sup>7</sup> LOZANO, Miguel ángel; RAMOS, José. Recuperación óptima de calor en sistema de cogeneración con motores de combustión interna. En: VIII Congreso Nacional de Ingeniería Termodinámica. (19,20-21, junio, 2013: Burgos). Libro de Actas. pp. 859-868.

Figura 8. Balance energético de un motor 40V12AG



Fuente: VIII Congreso Nacional de Ingeniería – Burgos 2013

La eficiencia térmica de una planta de generación eléctrica es medida mediante lo que en la industria se denomina Heat Rate, que no es más que la relación entre la energía térmica entregada por el combustible y la energía eléctrica generada y se expresa comúnmente en BTU/Kwh. Al aprovechar los gases de escape con un sistema de recuperación este indicador de rendimiento en una planta de generación se verá mejorado indiscutiblemente, lo que lleva a mejorar las utilidades y volver la instalación mucho más competitiva en el mercado.

### 2.1.3 Disminución del impacto medioambiental por la recuperación de los gases de escape de un motor de combustión interna

La recuperación de los gases de escape de los motores a combustión interna además de tener un efecto directo sobre el aprovechamiento de la energía térmica del combustible empleado tiene un efecto colateral sobre las emisiones de dióxido de carbono al ambiente, como se menciona por Banda y Gutierrez<sup>8</sup>, el indicador de toneladas de CO<sub>2</sub> / Kwh debe verse disminuido al implementar un sistema de recuperación de gases de escape en un motor de combustión interna empleado en la generación de energía.

La mejora en la eficiencia energética se vuelve fundamental y prácticamente obligatoria en la tarea de reducir emisiones de gases de efecto invernadero y combatir el cambio climático global. La cogeneración en cualquier sistema de generación proporciona esta gran ventaja.

Además, existe un impacto positivo para el medio ambiente en términos de reducción del consumo de agua utilizada en el proceso de extracción de combustibles fósiles. Al aprovechar la energía de manera más eficiente y reducir el consumo de combustibles, se disminuye la necesidad de extracción y producción de combustibles, lo que resulta en un ahorro significativo de millones de metros cúbicos de agua.

## 2.2 HISTORIA DE LOS MOTORES A GAS

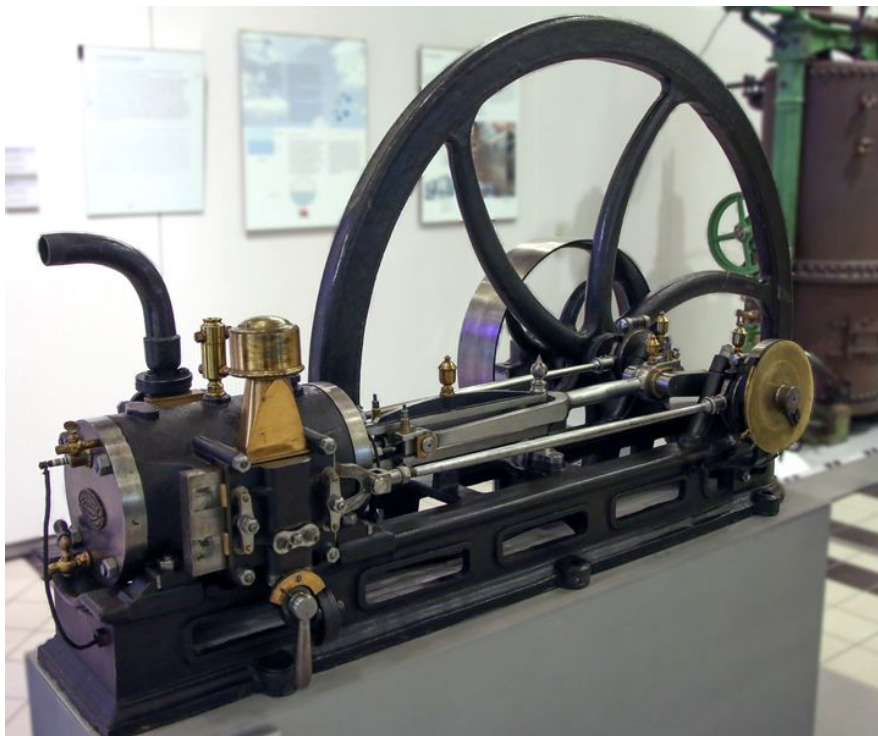
El primer motor a gas natural fue construido con éxito por el ingeniero Francés Étienne Lenoir en 1859, el cual constaba de un solo pistón y era de un solo tiempo, para poder devolver el recorrido del pistón era necesario realizar una nueva ignición al lado contrario

---

<sup>8</sup> BANDA, Patricio; GUTIERREZ, Christian. Simulación de un Sistema Recuperador de Calor para Gases de Escape de Motogeneradores a Crudo. En: Revista Técnica "energía". Enero, 2016, No 12, Pp. 230-238. ISSN 1390-5074.

del pistón, para eso necesitaba dos bujías. El motor funcionaba con una mezcla de gas de carbón y aire, y tenía una eficiencia termina de apenas 5% pero marcó un gran avance en la investigación de las maquinas térmicas como lo menciona GAVIRIA, MORA & AGUDELO<sup>9</sup>, en la figura 9 se puede observar un ejemplar del motor Lenoir almacenado en el conservatorio de artes de París.

Figura 9. Ejemplar de motor Lenoir



Fuente:

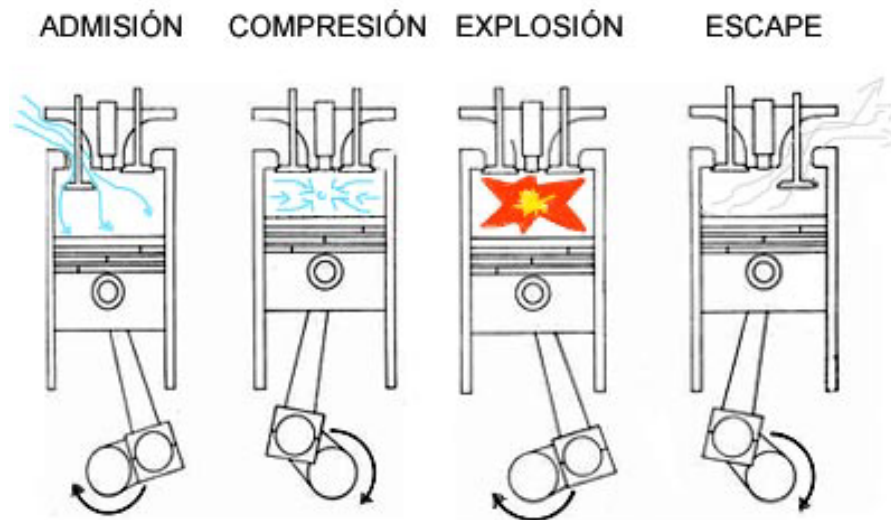
[http://historico.oepm.es/museovirtual/galerias\\_tematicas.php?tipo=INVENTOR&xml=Lenoir,%20Jean-Joseph%20Etienne.xml](http://historico.oepm.es/museovirtual/galerias_tematicas.php?tipo=INVENTOR&xml=Lenoir,%20Jean-Joseph%20Etienne.xml)

---

<sup>9</sup> GAVIRIA, Jorge E; MORA, Jorge H; AGUDELO, Jhon R. Historia de los motores de combustión interna. Revista facultad de ingeniería. Junio, 2002, nro 26, pp.68-78

En el año 1862 otro inventor francés Alphonse Beau de Rochas ingenió el motor de 4 tiempos, pero fue el Alemán Nikolaus August Otto quien en 1876 se llevaría el reconocimiento científico al construir el primer motor de cuatro tiempos que, basado en los principios de Rochas, aprovechaba una carrera del pistón para la admisión del gas y aire, luego en la segunda carrera se comprimía la mezcla para ser explotada y expandida. Actualmente los 4 tiempos establecidos son; Admisión, Compresión, Explosión y escape. Ver figura 10.

Figura 10. Ciclos del motor de 4 tiempo Otto



Fuente: <https://sites.google.com/site/queesunamaquinatermica/combustion-interna/4-1-el-motor-de-4-tiempos>

Algunos años más tarde la patente de Otto sería demandada por Rochas ganando así el reconocimiento económico, pero históricamente se sigue reconociendo el ciclo de cuatro tiempos a Otto.

Los motores a gas son utilizados para utilizar la energía térmica del gas (gas natural, Metano, Hidrogeno, entre otros), para generar energía mecánica mediante la aplicación del principio de los cuatro tiempos de Otto, la ignición del combustible gaseoso se realiza en la cámara principal por medio de compresión y la chispa de una bujía.

Actualmente debido a la necesidad de reducir emisiones ambientales, los motores a gas más eficientes utilizan el concepto de mezcla pobre, donde la relación estequiométrica (mezcla aire / combustible) determinada el factor Lambda es superior a 1, lo que quiere decir que se inyecta una cantidad muy inferior de combustible comparada con la cantidad de aire, este concepto denota un incremento en la eficiencia del motor al generar consumos bajos de combustible, pero también limita la potencia del equipo.

Al tener poco combustible para quemar es necesario que la cámara de combustión alcance altas presiones para lograr la explosión requerida, esto conlleva a tener grandes picos de temperatura en la cámara y a trabajar muy cerca al rango de detonación del gas, por lo que los motores a gas modernos utilizan avanzados sistemas de control por cilindro para controlar la presión y temperatura evitando a toda costa la detonación o como es conocido en la industria el knocking.

Los motores a gas son empleados en la generación de energía debido a la abundancia del combustible en algunos sectores del planeta y la facilidad para transportarlo, puede ser entregado directamente a los motores por gaseoducto y no requiere ser almacenado para su consumo, con si ocurre con los combustibles líquidos. Ver figura 11.

Figura 11. Motores a gas en la generación eléctrica



Fuente: De Benedikt Schneider - Trabajo propio, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=19787512>

### 2.3 TURBOGENERADORES

Los turbogeneradores son equipos utilizados para convertir la energía térmica o hidráulica en energía eléctrica, básicamente constan de tres partes principales; la turbina, el generador y un reductor de velocidad, adicionalmente debe contener equipos auxiliares como sistema de control, lubricación, enfriamiento, entre otros.

La capacidad del turbogenerador está dada por la capacidad de la turbina instalada, la cual se encarga de convertir la energía térmica o hidráulica en energía mecánica, pero también depende de la capacidad del generador eléctrico que encarga de convertir la energía mecánica de la turbina en potencia eléctrica. La salida de potencia eléctrica está controlada por un sistema de control de velocidad de la turbina, que en la mayoría de las ocasiones consta de una o más válvulas de bypass que regulan el paso de combustible por la turbina (Gas, gases de escape o vapor), haciendo que esta aumente o disminuya

la velocidad y por consecuencia varia la potencia eléctrica de salida. En la figura 12 se pueden observar las principales partes de un turbogenerador.

Partes de un turbogenerador:

0. Turbina de gas
1. Generador eléctrico
2. Reductor de velocidad
3. Envolvente
4. Sistema de lubricación
5. Sistema de filtrado de aire
6. Puntos de conexión
7. Sistema de combustible
8. Sistema de control
9. Sistema de salida de gases de escape

Figura 12. Partes de un turbogenerador



Fuente: Guía de la Cogeneración – Fundación de la energía de la comunidad de Madrid.

## 2.4 MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

El mantenimiento industrial está puede entenderse como un conjunto de actividades que se realizan durante el ciclo de vida de un elemento con el fin de conservar o restablecer su funcionamiento a lo largo de su ciclo de vida, garantizando siempre la seguridad de las personas, el cuidado del medio ambiente y a un costo optimo.

El mantenimiento es aplicado a objetos, máquinas o equipos industriales en los cuales preservar su vida útil resulta fundamental para la naturaleza de cualquier negocio, las actividades que abarca el mantenimiento deben ser de carácter técnico, administrativas y de gestión, todas encaminadas a mantener la disponibilidad del equipo en el valor más alto posible, optimizando los costos asociados a estas actividades.

Algunos de los objetivos implícitos del mantenimiento como los menciona DÍAZ NAVARRO<sup>10</sup> son:

- Aumentar la disponibilidad de los equipos hasta el nivel preciso.
- Reducir los costos al mínimo compatible con el nivel de disponibilidad necesario.
- Mejorar la fiabilidad de las maquinas e instalaciones.
- Asistencia al departamento de ingeniería en nuevos proyectos.

### 2.4.1 Historia del Mantenimiento.

El mantenimiento nace a partir de la revolución industrial en el siglo XVII y la necesidad de reparar las primeras maquinas inventadas por el hombre para la producción de productos de consumo, esta tendencia a reparar las máquinas se mantuvo en las industrias hasta finales de la segunda guerra mundial en 1945, donde en las fábricas

---

<sup>10</sup> DÍAZ NAVARRO, Juan. Técnicas de mantenimiento industrial. España: Calpe Institute of Technology. 2007. p.2

industriales era el personal operativo quien realizaba el mantenimiento correctivo a las maquinas, esta fue nombrada la primera generación del mantenimiento y en su totalidad estuvo marcada por el mantenimiento de tipo correctivo.

La segunda generación del mantenimiento nace después de la segunda guerra mundial y dura hasta finales de los años 70, en esta se hace imperativa la necesidad de garantizar que los equipos funcionaran durante un periodo de tiempo más largo, nace el concepto de mantenimiento preventivo, planeación de mantenimiento y se descubre la relación de edad del equipo versus probabilidad de falla como es mencionado por DÍAZ NAVARRO<sup>11</sup>.

La tercera generación del mantenimiento se desarrolló a partir de los años 80, donde la monitorización constante de los parámetros operativos de un equipo se convirtió en clave para profundizar en la relación causa-efecto de una falla y aumentar la efectividad en las intervenciones realizadas, nace el concepto de mantenimiento predictivo y algunas técnicas de mantenimiento como el RCM la cual empieza a ser aplicado en diferentes industrias. Se establecen rutinas de monitoreo constante y las técnicas de predicción estadística entran a formar parte del mantenimiento.

La cuarta generación del mantenimiento está dada a partir de los años 90 y en ella se concibe el mantenimiento como una gestión importante y parte de los procesos de una empresa, nace el concepto de mantenimiento basado en riesgos y el mantenimiento como calidad total, las empresas empiezan a medir la gestión del mantenimiento con indicadores.

La quinta generación del mantenimiento nace a partir de la innovación tecnológica de 2014, donde la gestión de activos toma un papel fundamental en la concepción de las

---

<sup>11</sup> DÍAZ NAVARRO, Juan. Técnicas de mantenimiento industrial. España: Calpe Institute of Technology. 2007. p.2

industrias y la gestión del mantenimiento, en esta generación la eficiencia energética y las energías renovables abren nuevos panoramas exigentes a mantenimiento.

En la actualidad, año 2023 se cursa si se puede llamar así la sexta generación de mantenimiento, en la cual la inteligencia artificial (AI), la robótica y los computadores cuánticos son una realidad. Están en desarrollo técnicas modernas de mantenimiento como los gemelos virtuales, sistemas automáticos de mantenimiento y sistemas de monitoreo remoto para predicción de fallas con el uso de inteligencia artificial, también el uso de realidad virtual ha empezado a remplazar los entrenamientos y capacitaciones para los equipos de mantenimiento. Son grandes avances que sin duda impactarán de manera positiva el mantenimiento. En la figura 13 se resumen las generaciones del mantenimiento.

Figura 13. Gráfico de la historia del mantenimiento



Fuente: Autor

#### 2.4.2 Mantenimiento Correctivo.

El mantenimiento correctivo es el que se lleva a cabo después de la ocurrencia de un fallo o avería, por lo tanto, se considera reactivo y se ejecuta con la finalidad de restablecer las funciones operativas de una máquina tras la pérdida de capacidad en el elemento averiado.

Como es mencionado por MORA<sup>12</sup> el mantenimiento correctivo debe ser de corto tiempo y una de sus principales desventajas es que puede ocurrir en cualquier momento, normalmente el equipo de operadores de la maquina es el primero en detectar la falla, por lo tanto, estos deben estar entrenados en técnicas de detección de fallas y contar con amplia experiencia.

Existen dos clases de intervenciones correctivas, la primera funciona para desvarar el equipo y puede restablecer la funcionalidad, pero es posible que no retorne la máquina a valores estándar y se aplica en momentos donde no se puede parar la producción. Una ventaja de esta clase de intervención es que no se requiere una gran capacidad de análisis ni una gran infraestructura DÍAZ NAVARRO<sup>13</sup>

La segunda clase de intervención correctiva es una mucho más fundamentada en el análisis de causa raíz y debe ser ejecutada por personal idóneo bajo la premisa de haber ubicado claramente el motivo de la avería y realizar las actividades pertinentes para restablecer el quipo a su condición estándar.

Sin duda alguna el mantenimiento correctivo presenta algunas desventajas evidentes como la perdida de producción, necesidad de un stock de repuestos y una baja calidad

---

<sup>12</sup> MORA, Luis A. Mantenimiento. Planeación, ejecución y control. México: Alfaomega Grupo Editor S.A, 2009. p.426

<sup>13</sup> DÍAZ NAVARRO, Juan. Técnicas de mantenimiento industrial. España: Calpe Institute of Technology. 2007. p.9

del mantenimiento por la premura de la reparación, por lo tanto es importante saber que es necesario incluirlo en el programa de mantenimiento pero debe ser aplicado a equipos no críticos y donde no se va a entorpecer la producción en caso de que ocurra, y cuando los costos por parada son menores a los costos del mantenimiento preventivo, con esto se lograría el máximo aprovechamiento de la vida útil de los elementos de estos equipos, como lo menciona DÍAZ NAVARRO<sup>14</sup>

#### 2.4.3 Mantenimiento Preventivo.

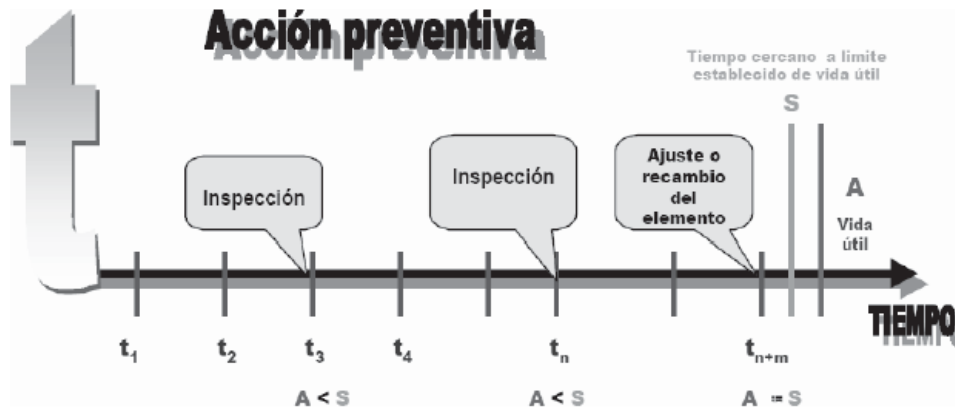
El mantenimiento preventivo nace con la necesidad mantener la disponibilidad de los equipos o maquinas en su nivel más alto, está basado en intervenciones planeadas ya sea en intervalos de tiempo establecidos o por condiciones detectadas en la operación, y tiene la finalidad de reducir la probabilidad de falla y por ende pérdidas indiscriminadas de tiempo, producción y costos asociados.

En el mantenimiento preventivo es necesario planear inspecciones periódicas a los equipos y que se lleven los registros necesarios que permitan realizar un cálculo estimado de la frecuencia de intervención de una maquina, o pieza que necesite ser remplazada antes de su falla, muchos fabricantes de piezas o equipos entregan la frecuencia de remplazo, pero lo más importante recopilar la información necesaria para que la toma de decisiones en la planeación del mantenimiento permita intervenir justo antes de que se presente la falla y se aproveche la mayor cantidad de vida útil posible sobre el elemento o equipo. Ver figura 14.

---

<sup>14</sup> DÍAZ NAVARRO, Juan. Técnicas de mantenimiento industrial. España: Calpe Institute of Technology. 2007. p.9

Figura 14. Tiempo de la acción preventiva



Fuente: Mantenimiento. Planeación, ejecución y control por Luis A. Mora

Al aplicar el mantenimiento preventivo se tienen algunas ventajas mencionadas por BORRAS<sup>15</sup>, y algunas desventajas que menciona DÍAZ NAVARRO<sup>16</sup>.

Ventajas:

- Reducción de fallas prematuras.
- Reducción del impacto en la falla debido a revisiones periódicas.
- Control de la degradación de un elemento.
- Control y disminución de costos al evitar el correctivo.
- 

Desventajas:

- No se aprovecha la totalidad de la vida útil del elemento o equipo

<sup>15</sup> BORRÁS, Carlos P. Mantenimiento Preventivo. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga: 2016. 82 p.p.

<sup>16</sup> DÍAZ NAVARRO, Juan. Técnicas de mantenimiento industrial. España: Calpe Institute of Technology. 2007. p.10

- Incrementa el gasto y reduce la disponibilidad si no se seleccionan correctamente las frecuencias de intervención.

#### 2.4.4 Mantenimiento Predictivo.

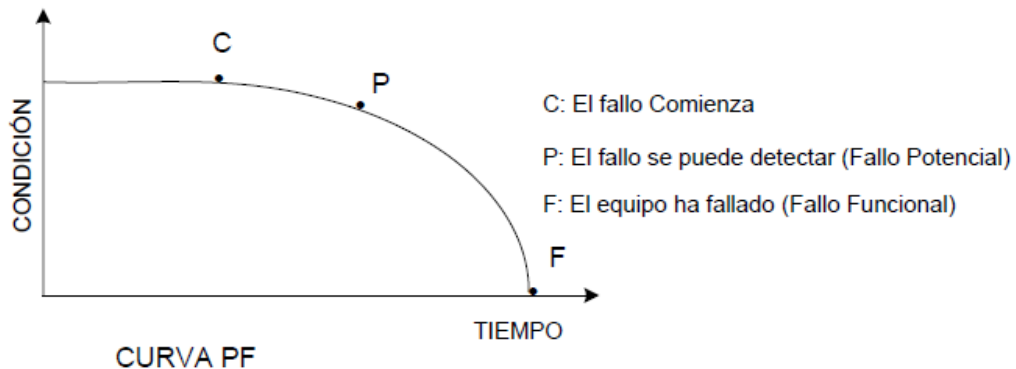
El mantenimiento predictivo en realidad es parte del mantenimiento preventivo no secuencial y está basado en el monitoreo constante de los parámetros operativos de un equipo; presión, temperatura, vibraciones, corrosión, desgaste, con el ánimo de asociarlo a la ocurrencia de falla y poder determinar con certeza la frecuencia de intervención como lo menciona MORA<sup>17</sup>, de esta manera lograr optimizar los recursos necesarios y generar el menor impacto posible en la acción de mantenimiento.

En la mayoría de las ocasiones las fallas aparecen en las máquinas de manera incipiente mostrando signos que pueden ser detectados siguiendo el monitoreo y procedimiento correcto. Un buen ejemplo de eso se expresa en la famosa curva de probabilidad de falla PF, que se muestra en la siguiente figura, donde es claro que antes de ocurrir la falla F, existe un punto de Comienzo C y un punto de fallo potencial P, gracias al predictivo es posible detectar las anomalías e intervenir el equipo en algún punto entre C y F.

---

<sup>17</sup> MORA, Luis A. Mantenimiento. Planeación, ejecución y control. México: Alfaomega Grupo Editor S.A, 2009. p.433

Figura 15. Curva PF



Fuente: Técnicas de Mantenimiento industrial por Juan Díaz Navarro

La predicción en el mantenimiento está dada con la aplicación de técnicas matemáticas y estadísticas sobre la información recopilada periódica y sistemáticamente del comportamiento operativo de una variable en un equipo o proceso.

El mantenimiento predictivo en algunos casos requiere una inversión inicial alta, ya que es necesario la adquisición de equipos de monitoreo, así como el entrenamiento de personal para que este calificado en la manipulación de ellos, un ejemplo de esto es un sistema de monitoreo de vibraciones, equipos de medición termográfica o laboratorios de tribología, pero sin lugar a duda es necesario si se quiere garantizar una disponibilidad alta en una planta o equipo.

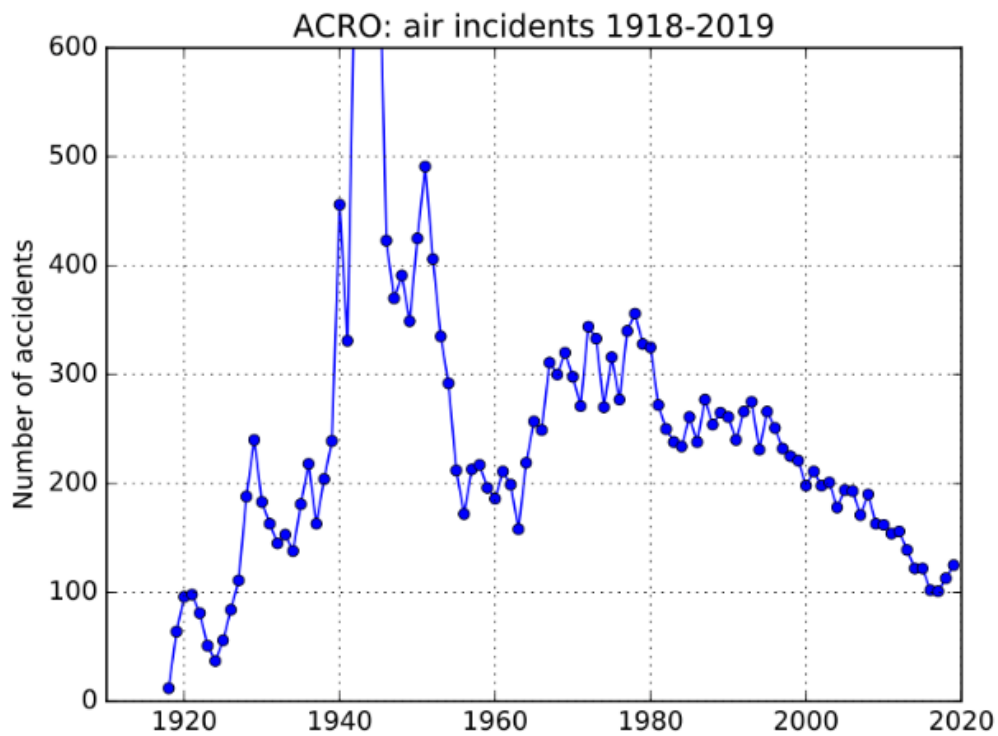
Para la aplicación de un modelo de mantenimiento predictivo es importante realizar una evaluación de criticidad de equipos, incluyendo costos de producción, lucro cesante y posibles afectaciones al medio ambiente. Lo más recomendable es aplicar un predictivo sobre los equipos que den como resultado una criticidad más alta y de esta manera de optimice el costo de mantenimiento.

## 2.5 MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD RCM

### 2.5.1 Historia del Mantenimiento centrado en confiabilidad RCM.

A finales de 1960 la industria de la aviación comercial estaba pasando por momentos difíciles, pues presentaba una tasa de accidentalidad del 6% en vuelos comerciales, eso quiere decir que, por cada un millón de vuelos, sesenta sufrían incidentes o accidentes, en la mayoría de los casos las fallas obedecían a problemas mecánicos en los aviones. Ver figura 16.

Figura 16. Incidentes y accidentes aéreos registrados por ARO 1918-2019



Fuente: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=59559017>

Las acciones que se tomaron a raíz de las diferentes fallas en la industria de las aeronaves fue incrementar la frecuencia de mantenimientos preventivos y hacer equipos redundantes, las piezas principales era remplazadas antes de que cumplieran su vida útil con la intención de evitar que se produjera la falla.

Al redundar en el mantenimiento se pensaba evitar el cumplimiento de la vida útil en las piezas principales que sufrían más desgaste y de esta manera evitar las falla, o garantizar una falla tolerante, tal como lo mencionan Nowlan y Heap<sup>18</sup>, estas acciones llevaron a las aerolíneas a alcanzar elevados costos de mantenimiento y no fueron efectivas. En lugar de reducir la cantidad de fallas, los gerentes de las aerolíneas evidenciaron un incremento.

Entre 1960 y 1970 la administración federal de aviación de los Estados Unidos de América FFA, estableció, en compañía con las fabricantes y operadores de aeronaves, un estándar para el desarrollo de tareas de mantenimiento el cual fue denominado MSG (Maintenance Streering Gruop).

Como es mencionado por la NAVSEA<sup>19</sup> el estándar MSG fue el primero en utilizar un árbol de decisión como método para definir las tareas de mantenimiento preventivo necesarias, resultando ser muy eficaz ya que estaba enfocada en la confiabilidad y seguridad de las operaciones, este estándar precedió la base del diseño del plan de mantenimiento del Boeing 747 y representa los inicios del RCM.

A principio de 1980 Moubrey<sup>20</sup> decide llevar esta metodología a otros campos de la manufactura y producción diferentes a la industria de la aviación comercial, enfocándose

---

<sup>18</sup> NOWLAN, F Stanley; HEAP, Howard F. Reability-Centered Maintenance. San Francisco: United Airlines, 1978. 515 pp.

<sup>19</sup> NAVSEA. Reliability Centered Maintenance (RCM) Handbook. Port Hueneme: Navsea, 2007. P.1-1

<sup>20</sup> MOUBRAY, John. Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad. New York: Industrial Press Inc, 1997. P. 5-6

en responder a las variables expectativas en el mantenimiento, como el hecho de tener cada vez diferentes modos de falla que pueden afectar la seguridad, el medio ambiente y la calidad del producto entregado.

Hacia 1999 se realizó la publicación por parte de “THE ENGINEERING SOCIETY FOR ADVANCING MOBILITY LAND SEA AIR AND SPACE” del Standard SAE JA1011, la que probablemente es el desarrollo más importante en el campo del RCM de los últimos tiempos, como lo menciona BAUTISTA y BERMELO<sup>21</sup>

En la actualidad el mantenimiento basado en confiabilidad RCM hace parte de un juego de herramientas gerenciales enfocados al ciclo de vida de los activos y la mejora continua, donde ha surgido enfoques distintos como el de la confiabilidad humana, mencionada por el profesor Ortiz<sup>22</sup>.

#### 2.5.2 Metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad RCM.

El mantenimiento basado en confiabilidad es una metodología de planeación del mantenimiento que pretende que un sistema realice las funciones para lo cual fue concebido. Mediante la optimización de las tareas de mantenimiento preventivo, predictivo y proactivo se garantiza la confiabilidad del sistema dentro de su contexto operacional.

---

<sup>21</sup> BAUTISTA, Miguel; BERMELO, Nory. Diseño de una estrategia de mantenimiento centrado en confiabilidad RCM para una turbina de gas General Electric LM6000PC en térmicas Ecopetrol GDA. Monografía Especialista en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica.2015. p.65.

<sup>22</sup> ORTÍZ, Daniel. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad – MCC – Guía Práctica. Bucaramanga: 2017. 33 pp.

El proceso RCM implica responder siete preguntas básicas, tal como está descrito por Moubray<sup>23</sup> y en la SAE JA1012<sup>24</sup>.

- ¿Cuáles son las funciones y respectivos estándares de desempeño de este bien en su contexto operativo presente?
- ¿En qué aspecto no responde al cumplimiento de sus funciones?
- ¿Qué causa cada falla funcional (modos de falla)?
- ¿Qué sucede cuando se produce cada falla (efectos de la falla)?
- ¿Qué tan importante es cada falla (riesgos de la falla)?
- ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada falla (tareas proactivas y sus intervalos)?
- ¿Qué se haría si una tarea proactiva no puede desarrollarse (acciones por defecto)?

Para el desarrollo exitoso de la metodología es necesario la recolección de información dentro del contexto operacional del equipo a analizar y empezar definiendo las funciones como se describe en la sección 5.1 de la norma SAE JA1011<sup>25</sup>. Luego de ello, se definirán las diferentes fallas funcionales y los modos de falla razonablemente probables de ocurrir.

El siguiente paso en la metodología es analizar los efectos y consecuencias que cada modo de falla puede llegar a causar, y determinar la criticidad de cada uno de ellos, para llegar a decidir sobre las tareas de mantenimiento necesarias. Como es mencionado por

---

<sup>23</sup> MOUBRAY, John. Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad. New York: Industrial Press Inc, 1997. P. 5-6

<sup>24</sup> THE ENGINEERING SOCIETY FOR ADVANCING MOBILITY LAND SEA AIR AND SPACE. Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC). SAE JA1012. USA: 2002. 62 p.p.

<sup>25</sup>THE ENGINEERING SOCIETY FOR ADVANCING MOBILITY LAND SEA AIR AND SPACE. Criterios de evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado En Confiabilidad. SAE JA1011. USA: 1999. 12 pp

GROSSO<sup>26</sup> este paso es fundamental para incluir dentro de la gestión del mantenimiento la seguridad de las personas y el medio ambiente.

Al final del proceso la metodología nos arrojará un plan de mantenimiento que permitirá optimizar las tareas y los costos de mantenimiento. El RCM no pretende eliminar el 100% de las fallas presentada en un equipo, pero si se centra en las fallas que afectan de manera determinante la seguridad, el medio ambiente y la capacidad del equipo.

Como lo explica Ortiz<sup>27</sup>, no está dentro del alcance del RCM generar cambios de diseño en los equipos, solamente advertir sobre las deficiencias para que otros procesos de la empresa se encarguen de las mejoras necesarias. La metodología RCM también está enfocada en lograr un punto de equilibrio aceptable para la administración del costo y la confiabilidad.

---

<sup>26</sup> GROSSO, Juan Carlos. Programa de mantenimiento basado en RCM para los hidrogenadores de la central la Guaca. Monografía Especialista en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica.2004. p.52

<sup>27</sup> ORTÍZ, Daniel. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad – MCC – Guía Práctica. Bucaramanga: 2017. 33 pp.

### 3 RECOPIACION DE INFORMACION

#### 3.1 MANTENIMIENTO ACTUAL AL SISTEMA DE TURBOGENERADORES

Al presente, el equipo de operaciones y mantenimiento eléctrico (O&ME) de la planta de generación es el encargado de la ejecución de las tareas de mantenimiento planeadas y no planeadas de los turbogeneradores ETC300, estando estos equipos en custodia del supervisor eléctrico y de operaciones.

Los mantenimientos planeados se ejecutan con la misma frecuencia de mantenimiento establecida para los motores a gas en la planta de generación, ya que en la taxonomía general de la planta los motores son los de mayor importancia. El mantenimiento inicia con el lanzamiento de la orden de trabajo (WO) por parte del sistema de gestión de mantenimiento utilizado llamado Maximo de IBM<sup>28</sup>, la orden de trabajo es aprobada por el gerente de planta o supervisor eléctrico y de operaciones, quien a su vez la asigna al personal técnico para su ejecución.

La ejecución de mantenimientos no planeados en los turbogeneradores ETC300 siempre han correspondido a algún tipo de correctivo por falla. Debido a lo inesperado que resultan estos eventos, la orden de trabajo es creada después de la intervención del equipo de mantenimiento. En ciertas oportunidades, cuando la falla es de las tarjetas electrónicas del sistema de control, es necesario el soporte remoto del fabricante desde Londres para reprogramar las nuevas tarjetas instaladas, por lo tanto, esta clase de fallas representan un mayor tiempo de reparación.

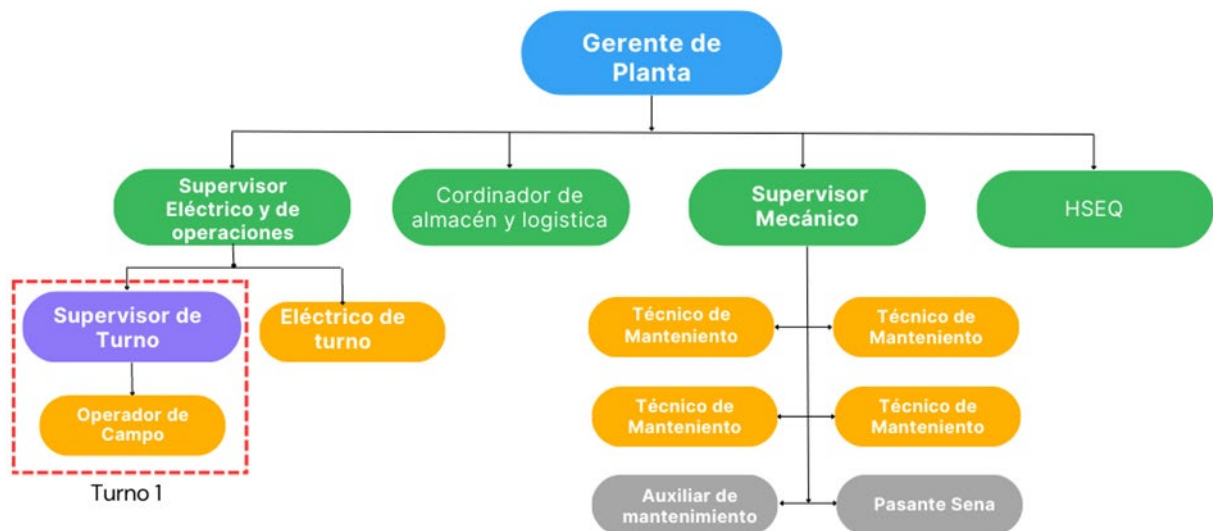
---

<sup>28</sup> Maximo de IBM, <https://www.ibm.com/es-es/products/maximo/asset-management>

### 3.2 EQUIPO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

El equipo de O&M de la planta de generación está conformado por 20 personas directamente contratadas con la compañía, distribuidas en las áreas de operaciones, mantenimiento y funciones administrativas, actualmente la planta opera bajo 3 turnos de 8 horas para el equipo de operaciones, por lo tanto, son requeridos 4 equipos operativos que están conformados por un supervisor de turno y el operador de campo. Ver figura 17.

Figura 17. Organigrama Planta de generación



### 3.3 ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO ACTUAL DEL SISTEMA

Las actividades de mantenimiento que actualmente se desarrollan en el sistema de turbogeneradores ETC300 están basadas principalmente en tareas de inspección y limpieza básica, que están sujetas a la frecuencia de mantenimiento del motor principal de generación.

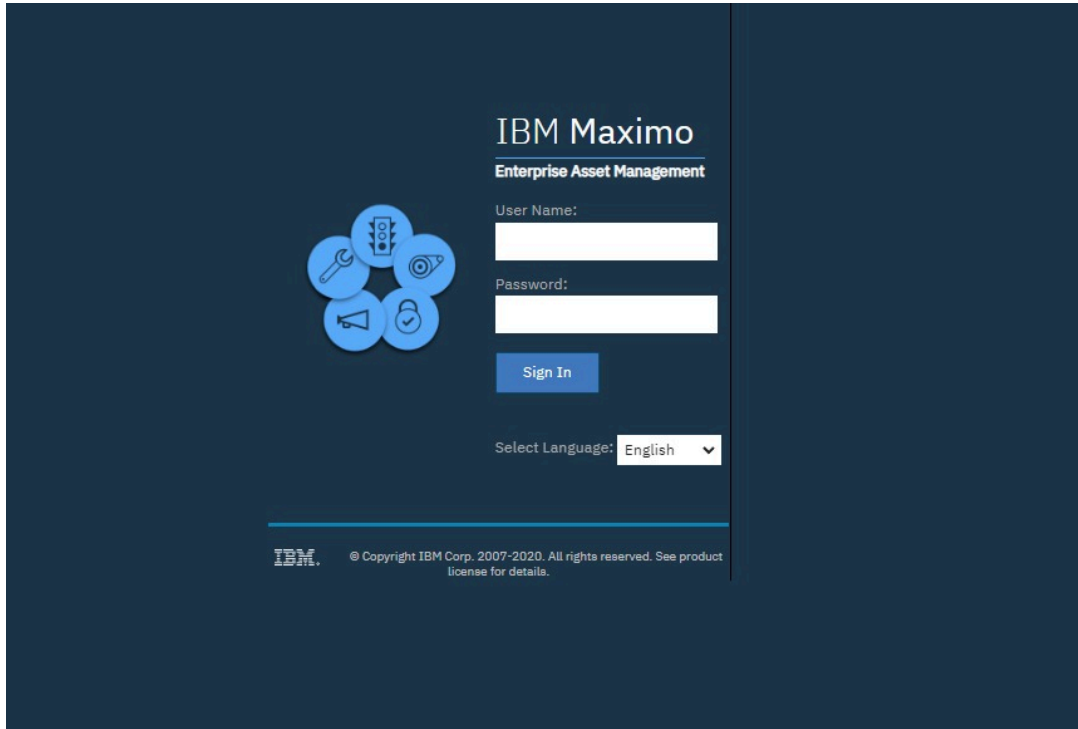
### **3.4 REGISTRO DE MANTENIMIENTOS**

Los mantenimientos realizados son registrados en el sistema de gestión de mantenimiento llamado Maximo, mediante el diligenciamiento y proceso de las órdenes de trabajo respectivas, en este sistema se carga información como:

- Fecha de realización del mantenimiento
- Número de Análisis de trabajo seguro
- Número de permiso de trabajo
- Nombre del responsable de la actividad
- Tipo de mantenimiento realizado (Planeado, Correctivo, Predictivo, Otro)
- Registro de las actividades de mantenimiento realizadas
- Tiempo de la ejecución de las tareas
- Horas de operación del equipo intervenido
- Repuestos utilizados.

En caso de ser un mantenimiento correctivo se adiciona información relacionada con la causa de la falla y el elemento averiado. En las figuras 18 y 19 se puede apreciar el acceso a la aplicación del sistema Máximo y el diligenciamiento de una orden de trabajo.

Figura 18. Maximo de IBM



Fuente: Equipo de Operaciones y mantenimiento eléctrico -Recolección de información en planta de generación

Figura 19. Orden de trabajo en Maximo

Secuencia*	Tarea*	Resumen	Grupo propietario	Tipo de trabajo	Work Result	Estado	ID de referencia externa
10	Inspección Sistema de Lubricación		SITETEAM	INSPCT	Q	WAPPR	Q
20	Inspección Sistema de Agua		SITETEAM	INSPCT	Q	WAPPR	Q
30	Inspección al Sistema Neumático		SITETEAM	INSPCT	Q	WAPPR	Q
40	Inspección al TG		SITETEAM	INSPCT	Q	WAPPR	Q
50	Inspección TC Bowman		SITETEAM	INSPCT	Q	WAPPR	Q

Fuente: Equipo de Operaciones y mantenimiento eléctrico -Recolección de información en planta de generación

El equipo de operaciones y mantenimiento eléctrico en sala de control también registra las actividades realizadas en la bitácora llevada en la aplicación OneNote de Microsoft<sup>29</sup>, esta aplicación permite que el documento se diligencie en línea y sea compartido con los miembros de los equipos interesados y de esta manera se realicen consultas posteriores de la bitácora. Ver figura 20.

Figura 20. Bitácora de Operaciones y Mantenimiento Eléctrico

The screenshot shows the OneNote application interface. On the left, there is a navigation pane with a monthly calendar for 2022, with December selected. The main content area contains several sections:

- Producción Turbogeneradores:** A table with columns 'Unidad', 'En línea', and 'Novedades:'.
 

Unidad	En línea	Novedades:
1	<input checked="" type="checkbox"/>	
2	<input checked="" type="checkbox"/>	
3	<input checked="" type="checkbox"/>	
4	<input checked="" type="checkbox"/>	
5	<input checked="" type="checkbox"/>	
6	<input type="checkbox"/>	Fuera de línea por falla en tarjeta electrónica y borneras junction box quemad
- Producción Jenbacher:** A table with columns 'Unidad', 'Potencia (kW)', and 'Observaciones'.
 

Unidad	Potencia (kW)	Observaciones
7	1040	oscilando
8	1042	oscilando
9	1037	oscilando
- Presión City gate (bar):** A text entry showing '6.00'.
- Compresores de aire:** A table with columns 'Equipo', 'PC (bar)', 'PD (bar)', and 'Obs'.
 

Equipo	PC (bar)	PD (bar)	Obs
D001	26.5	30	
D002	26	30	
- Temperatura BAO:** A text entry with some obscured characters.

Fuente: Equipo de Operaciones y mantenimiento eléctrico -Recolección de información en planta de generación.

<sup>29</sup> OneNote de Microsoft, <https://www.microsoft.com/es-co/microsoft-365/onenote/digital-note-taking-app>

### 3.5 FALLAS OCURRIDAS

Durante los últimos años de operación de la planta de generación en el sistema de recuperación de energía han ocurrido diferentes fallas funcionales que han comprometido la disponibilidad de los equipos de turbo generación. Los distintos modos de falla han ocurrido tanto en equipos eléctricos como mecánicos que hacen parte del sistema, en algunas oportunidades resolver los problemas le toma mucho tiempo al equipo debido a la necesidad de importar repuestos o soporte remoto por parte de fabricante.

En la siguiente tabla se logró recopilar información de 39 fallas ocurridas en los últimos 5 años de operación, donde se identifican los sistemas que fallaron y los tiempos totales de reparación que se registraron.

Tabla 1. Registro de fallas ocurridas

No. Falla	Equipo	Fecha salida	Tipo de falla	Sistema	Fecha de arranque	Horas de parada
1	3	6/03/2018	Tarjeta electrónica dañada	Módulo PE	15/08/2018	3888
2	4	6/03/2018	Tarjeta electrónica dañada	Módulo PE	8/03/2018	60
3	1	4/04/2018	Tarjeta electrónica dañada	Módulo PE	20/08/2018	3312
4	4	18/04/2018	Generador con variación de potencia	Generador	18/04/2018	5
5	5	18/04/2018	Tarjeta electrónica dañada	Módulo PE	17/08/2018	2904
6	6	29/04/2018	tubería de refrigerante rota	Sistema de enfriamiento	1/05/2018	48
7	4	4/05/2018	Turbina frenada	Turbina	1/11/2018	4344
8	2	9/05/2018	Tarjeta electrónica dañada	Módulo PE	13/05/2018	111
9	6	20/05/2018	Tarjeta electrónica dañada	Módulo PE	30/01/2019	6120
10	2	24/05/2018	Tarjeta electrónica dañada	Módulo PE	21/08/2018	2136
11	3	25/08/2018	Tarjeta electrónica dañada	Módulo PE	23/01/2019	3624
12	2	28/08/2018	Tarjeta electrónica dañada	Módulo PE	30/01/2019	3720
13	5	30/08/2018	Tarjeta electrónica dañada	Módulo PE	31/01/2019	3696
14	1	15/09/2018	Generador no sincroniza	Generador	16/09/2018	33
15	1	25/09/2018	Tarjeta electrónica dañada	Módulo PE	1/02/2019	3096
16	4	7/12/2018	Turbina frenada	Turbina	14/01/2019	912
17	2	11/02/2019	Comunicación perdida	Módulo PE	11/02/2019	4
18	1	26/02/2019	Modulo Con alta temperatura	Módulo PE	26/02/2019	3
19	2	26/02/2019	Comunicación perdida	Módulo PE	27/02/2019	40
20	6	2/02/2019	tubería de refrigerante rota	Sistema de enfriamiento	9/02/2019	168
21	6	15/03/2019	Tarjeta de sensado de tensión en falla	Módulo PE	15/03/2019	8

22	1	22/07/2019	Fuga de refrigerante	Sistema de enfriamiento	22/07/2019	4
23	4	6/07/2019	Tarjeta electrónica dañada	Módulo PE	17/01/2020	4680
24	6	18/07/2019	Tarjeta electrónica dañada	Módulo PE	22/01/2020	4512
25	5	9/09/2019	Sello de la turbina con fuga de aceite	Turbina	16/10/2019	888
26	1	3/10/2019	válvula de corte no abre	Sistema Neumático	10/10/2019	168
27	3	9/10/2019	Comunicación perdida	Módulo PE	9/10/2023	35076
28	3	12/02/2020	Motor eléctrico bomba de aceite en falla	Sistema de lubricación	19/02/2020	168
29	3	18/04/2020	Sobre velocidad en turbogenerador	Generador	1/10/2020	3984
30	4	18/04/2020	Tarjeta electrónica dañada	Módulo PE	28/01/2022	15600
31	3	18/10/2020	Turbina frenada	Turbina	4/11/2020	408
32	1	2/11/2020	Freno electrónico en activado	Módulo PE	9/02/2021	2376
33	1	8/08/2021	protección activada por sobrevoltaje	Módulo PE	4/02/2022	4320
34	6	17/08/2021	Tarjeta electrónica dañada	Módulo PE	10/09/2021	576
35	6	22/03/2022	Tarjeta electrónica dañada	Módulo PE	31/12/2022	6816
36	5	6/05/2022	Tarjeta electrónica dañada	Módulo PE	8/10/2022	3720
37	2	26/09/2022	Tarjeta electrónica dañada	Módulo PE	19/10/2022	552
38	5	19/10/2022	válvula reguladora en falla	Sistema Neumático	18/11/2022	720
39	5	1/12/2022	válvula de corte en error de posición	Sistema Neumático	2/12/2022	24
						122824

Fuente: Equipo de Operaciones y mantenimiento eléctrico -Recolección de información en planta de generación.

## 4 TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

### 4.1 DIAGRAMA DE PARETO

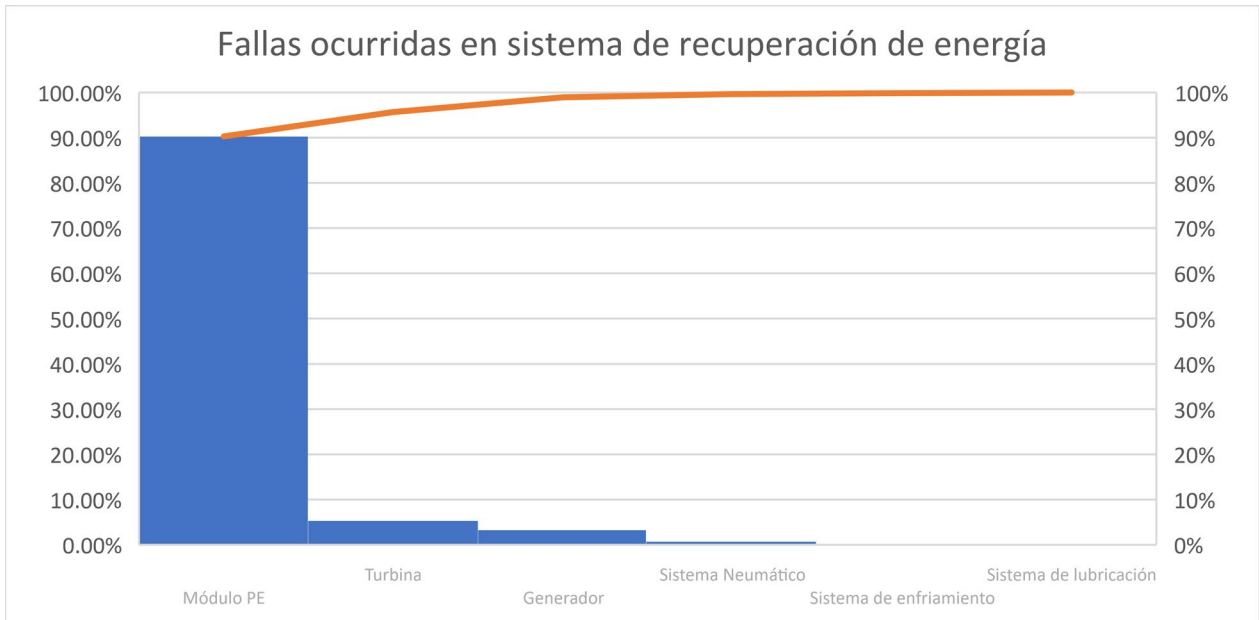
Partiendo de la información recopilada en el capítulo anterior sobre las fallas ocurridas en el sistema de recuperación de energía se ha elaborado un diagrama de Pareto.

El diagrama de Pareto es de gran utilidad y funciona como una herramienta para priorizar las fallas ocurridas en el sistema de recuperación de energía y así lograr identificar lo que en mantenimiento se denominan “malos actores”, es decir, los equipos o elementos del sistema que generan la mayor cantidad de fallas.

Este análisis permite que el enfoque de esta monografía se torne hacia los elementos más relevantes y que impactan de gran manera la disponibilidad del equipo, para poder desarrollar de manera efectiva y proponer el plan de mantenimiento basado en RCM que se plantea, asimismo lograr reducir los costos de mantenimiento y lograr aumentar la disponibilidad del equipo.

En el diagrama de Pareto que se presenta a continuación se pueden observar las fallas más frecuentes en orden descendente de importancia, en el eje horizontal se observan los diferentes subsistemas que comprenden la totalidad de las fallas analizadas en el sistema de recuperación de energía, y en el eje vertical el porcentaje acumulativo de las fallas.

Tabla 2. Pareto fallas turbogeneradores



Fuente: Autor

En el diagrama expuesto se puede apreciar que de manera determinante el módulo de potencia eléctrica representa el 90% de las fallas ocurridas en los últimos 5 años de operación del sistema de recuperación de energía, por lo tanto, será esencialmente tenido en cuenta para el desarrollo del taller RCM.

## 4.2 ANÁLISIS DE CRITICIDAD FALLAS VS CONSECUENCIAS

Se ha aplicado el método de análisis de criticidad utilizando el modelo semicuantitativo, para lograr jerarquizar el sistema de recuperación de energía por medio de turbogeneradores.

La información recopilada anteriormente sobre frecuencias de falla y tiempos de parada fue utilizada para evaluar la criticidad de cada elemento del sistema de recuperación de

energía, como efecto de multiplicar la frecuencia de fallas por las consecuencias generadas.

$$\text{Crítica} = \text{Frecuencia} \times \text{consecuencias} \quad [1]$$

La frecuencia de fallas ha sido tratada en la siguiente tabla, especificando la cantidad de años a evaluar para poder evaluar las fallas/año y el tiempo medio de reparación MTTR/año.

Tabla 3. Tabla frecuencia de fallas para análisis de criticidad

No.	Componente	# Fallas	Fallas/año	MTTR/año
1	Módulo PE	25	5	22190
2	Turbina	4	0.8	1310.4
3	Generador	3	0.6	804.4
4	Sistema Neumático	3	0.6	182.4
5	Sistema de enfriamiento	3	0.6	44
6	Sistema de lubricación	1	0.2	33.6
Fallas totales		39	7.8	24564.8
Semanas Evaluadas		260		
Periodo evaluado (Años)		5		

Fuente: Autor

Las consecuencias son evaluadas desde diferentes enfoques, teniendo en cuenta el impacto operacional (IO), flexibilidad operacional (FO), costo de mantenimiento (CO) y afectaciones en seguridad y medio ambiente (HSE). En la siguiente tabla se puede apreciar la ponderación asignada a cada aspecto para el cálculo de la consecuencia.

Tabla 4. Tablas de ponderación para análisis de criticidad

Tabla de ponderación		
Frecuencia de Falla (FF)	Mayor a 5 fallas año	4
	Entre 3 y 5 fallas año	3
	Entre 1 y 3 falla año	2
	Menor a 1 falla año	1
Impacto Operacional (IO)	Mas de 720 horas de parada	4
	Entre 120 y 720 horas de parada	3
	Entre 24 y 120 horas de parada	2
	Menos de 24 horas de parada	1
Flexibilidad Operacional (FO)	No Stock, Importación	4
	No stock, pero fácil consecución en el mercado	3
	Unidades en Stock solo para mantto	2
	Unidades suficientes en Stock	1
Costo de Mantenimiento (CM)	Mayor a 50000 EUR	6
	Entre 20000 EUR y 50000 EUR	4
	Entre 5000 y 20000 EUR	2
	Menos de 5000 EUR	1
Seguridad y Medio Ambiente (HSE)	Riesgo alto	6
	Riesgo medio	4
	Riesgo Bajo de afectación	2
	Sin riesgo a la salud, seguridad y ambiente	1

Fuente: Autor

Luego de determinar la ponderación para cada aspecto que representa un impacto significativo en el sistema, se realizó el cálculo y la evaluación de la criticidad, para la cual se desarrolló una matriz de frecuencia de fallas por consecuencia, donde la criticidad está medida con un sistema de colores asignado, donde el color verde significa una criticidad baja, el color amarillo una criticidad media y el color rojo una criticidad alta. Ver tablas 6 y 7.

Tabla 5. Cálculo de criticidad sistema de recuperación de energía

Evaluación de criticidad						Cálculo de consecuencias C= IO+FO+CM+HSE	Cálculo de Criticidad CTR= FF * C
Componente	FF	IO	FO	CM	HSE		
Módulo PE	3	4	4	6	6	20	60
Turbina	1	4	1	4	4	13	13
Generador	1	4	1	4	2	11	11
Sistema Neumático	1	3	4	2	2	11	11
Sistema de lubricación	1	2	2	2	4	10	10
Sistema de enfriamiento	1	2	2	2	2	8	8

Fuente: Autor

Tabla 6. Matriz de criticidad

Matriz de criticidad Sistema de recuperación de energía ETC300																				
Frecuencia (FF)	Consecuencia (C)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
4	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64	68	72	76	80
3	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60
2	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Criticidad baja
  Criticidad media
  Criticidad alta

Fuente: Autor

A partir de este análisis de criticidad se ha logrado identificar los 4 subsistemas críticos del sistema de recuperación de energía: Módulo PE, Turbina, Generador y sistema neumático, en los cuales se enfocará el desarrollo del plan de mantenimiento proactivo para garantizar su disponibilidad y reducir el riesgo de falla.

## **5 PROPUESTA DEL MODELO DE PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONFIABILIDAD**

### **5.1 EQUIPO RCM**

Es parte fundamental del desarrollo del modelo de mantenimiento basado en RCM asignar el equipo pertinente para que el sistema funcione correctamente y no solo que funcione, sino que mejore constantemente y sea retroalimentado con la experiencia y posibles mejoras, por lo tanto, se propone que el equipo este compuesto por las siguientes personas de la planta de generación:

- Gerente de planta
- Supervisor eléctrico y de operaciones
- Supervisor Mecánico
- Supervisor de turno
- Operador de turno
- Técnico eléctrico
- Técnico Mecánico
- Facilitador

En este caso es importante que en la selección de los técnicos y operadores se tenga en cuenta la experiencia específica y el conocimiento sobre el sistema de recuperación de energía, para que en realidad puedan aportar de manera significativa al mejoramiento continuo del taller.

El papel del facilitador es guiar las reuniones y enfocar al equipo a seguir siempre la metodología RCM para lograr las mejores prácticas de mantenimiento en el sistema de

recuperación de energía y así lograr la disponibilidad y confiabilidad deseada, sin exceder los costos estimados para el fin.

## **5.2 DEFINICIÓN DE FRONTERAS**

Como parte del desarrollo de la propuesta se ha realizado el análisis del sistema de recuperación de energía, donde se discriminaron los diferentes elementos que componen el equipo cuestión del estudio.

Para la definición de la frontera del taller RCM se tomará como base el análisis de criticidad realizado anteriormente, donde fue analizada la información recolectada sobre las fallas ocurridas en los últimos 5 años de operación, tiempo medio de reparación y las consecuencias calculadas.

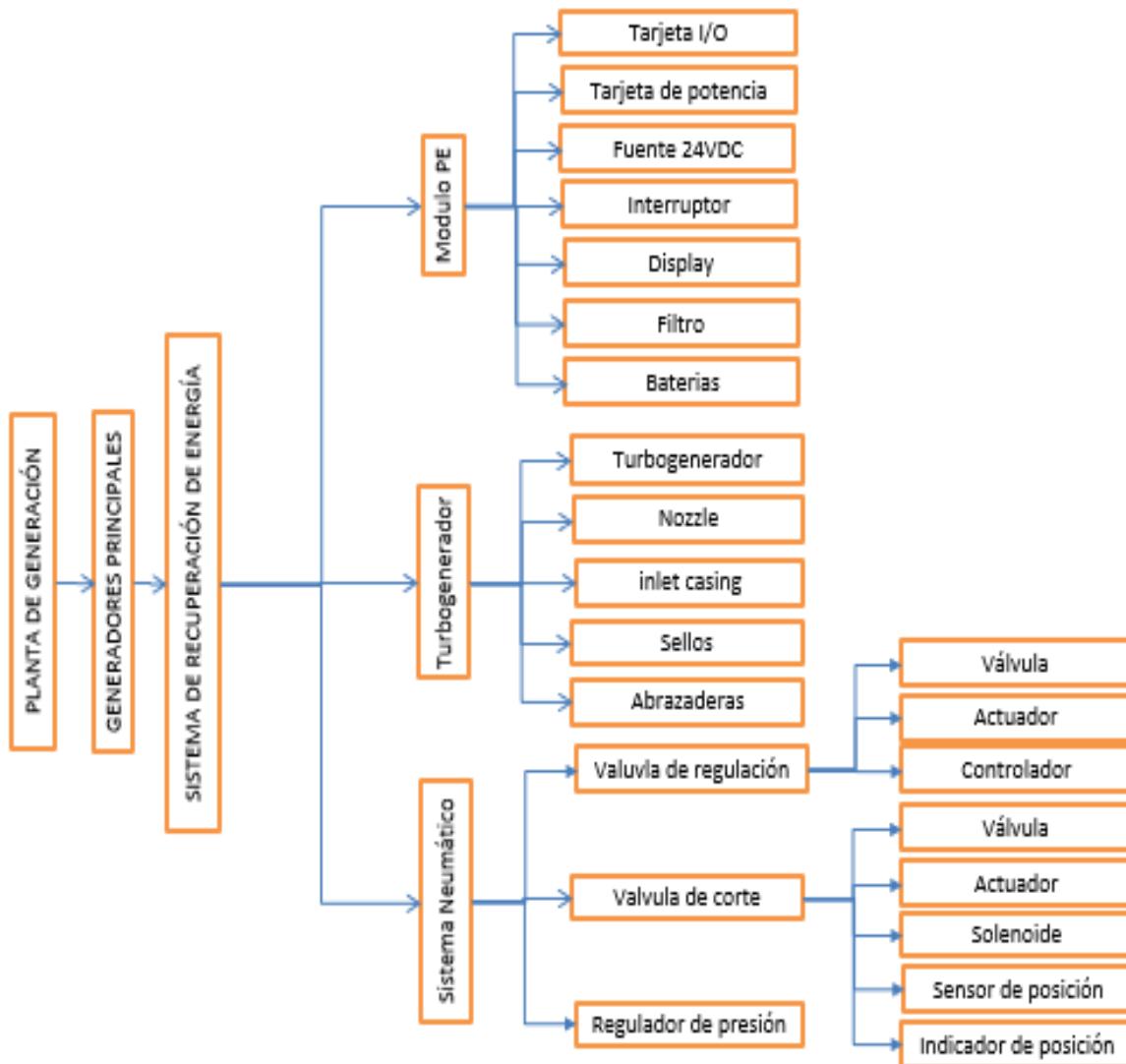
En el análisis de criticidad se contempló la turbina y el generador como dos elementos independientes, pero debido a que para el fabricante corresponde a una sola pieza que no puede ser remplazada de manera individual, se ha decidido trabajarla como un solo subsistema para el desarrollo del taller RCM.

Los subsistemas seleccionados para el desarrollo del taller RCM son:

- Módulo PE
- Turbogenerador
- Sistema neumático. (válvula reguladora y válvula de corte)

En la figura a continuación se puede observar la taxonomía del sistema de recuperación de energía basado en turbogeneradores después del análisis de criticidad realizado.

Figura 21. Taxonomía del estudio RCM

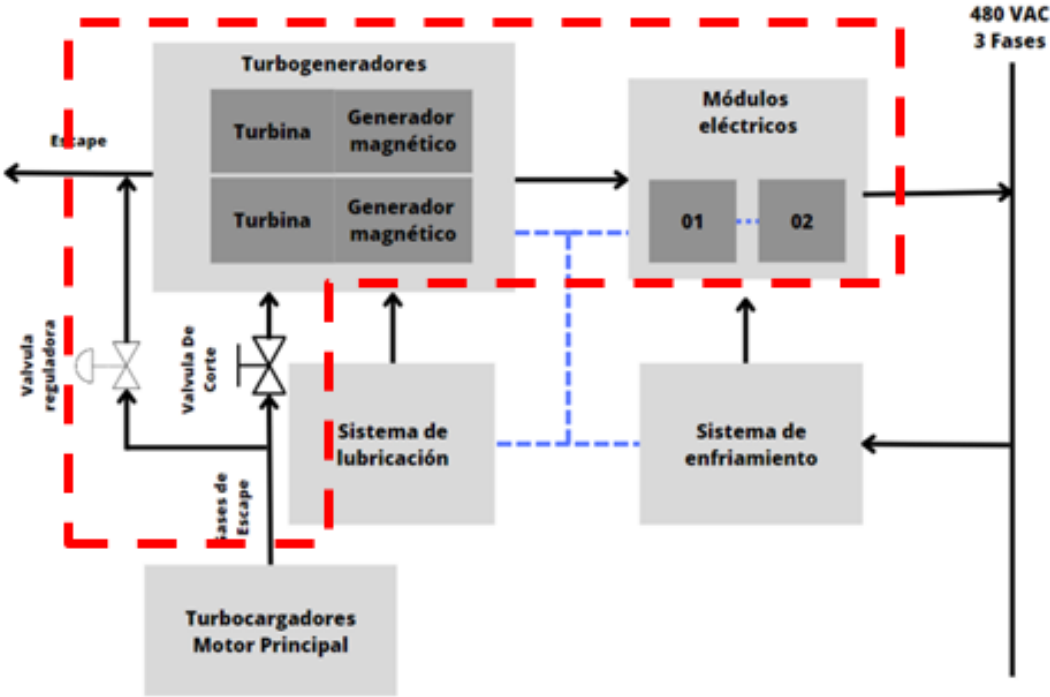


Fuente: Autor

Después de seleccionar los subsistemas para el desarrollo del taller RCM, la definición de las fronteras está marcada en la parte mecánica, desde la entrada de gases de escape por medio de las válvulas neumáticas de corte y regulación, hasta la salida de los gases en el turbogenerador. En la parte eléctrica desde la salida de bornes en los

turbogeneradores hasta los módulos de potencia PE. Como se puede observar en la siguiente figura.

Figura 22. Fronteras en el equipo de recuperación de energía



Fuente: Autor

**5.3 DEFINICIÓN DE FUNCIONES**

En el desarrollo de la metodología RCM es de vital importancia definir correctamente las funciones principales y secundarias del sistema de estudio. Las funciones principales son las que describen la razón de ser del equipo, y el motivo por el cual fue adquirido, y una falla de la función principal da como resultado una perdida significativa en la producción y afecta directamente la disponibilidad del equipo.

Por otro lado, las funciones secundarias resultan estar asociadas, a factores como la protección del medio ambiente, seguridad, contención, control, apariencia, confort y económicos, como lo expresa la norma SAE JA1012<sup>30</sup>, pero sin duda alguna muchas de las funciones secundarias pueden llegar a tener el mismo nivel de importancia que la función principal, por lo que en el desarrollo de la metodología a cada función descrita se le dará el mismo nivel de importancia.

Las funciones fueron definidas en el contexto operacional y siguiendo las recomendaciones de la metodología RCM. A cada función se le asignó un código de función F seguido por el número de la función, dando así respuesta a la primera de las 7 preguntas que propone la metodología RCM: ¿Cuáles son las funciones y respectivos estándares de desempeño de este bien en su contexto operativo presente? Ver Anexo A. Definición de funciones.

#### **5.4 DEFINICIÓN DE FALLAS FUNCIONALES Y MODOS DE FALLAS**

Se llevó a cabo la definición de fallas funcionales y sus respectivos modos de falla, basándose en el análisis exhaustivo de las fallas ocurridas previamente y los posibles modos de falla que podrían manifestarse en el sistema.

Para cada falla funcional identificada, se asignó un código de falla funcional que consiste en las iniciales “FF” seguidas del número correspondiente. En total, se lograron identificar 37 fallas funcionales en los elementos que fueron objeto del estudio RCM.

En cuanto a los modos de falla, se identificaron 97 modos de falla distintos, a los cuales se les asignó un código en la hoja RCM utilizando las iniciales “MF” seguidas del número

---

<sup>30</sup> THE ENGINEERING SOCIETY FOR ADVANCING MOBILITY LAND SEA AIR AND SPACE. Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC). SAE JA1012. USA: 2002. 62 p.p.

correspondiente al modo de falla, los detalles específicos de las fallas funcionales y modos de falla se pueden encontrar en el anexo B. Hoja RCM

Con la definición de las fallas funcionales y los posibles modos de falla se ha logrado responder a las preguntas 2 y 3 de la metodología RCM: ¿En qué aspecto no responde al cumplimiento de sus funciones? y ¿Qué causa cada falla funcional (modos de falla)?

## **5.5 EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LAS FALLAS**

Se analizaron los posibles efectos que cada modo de falla puede causar, partiendo desde la evidencia obtenida, donde el operador de la planta juega un papel fundamental al ser el primero en apreciar la anomalía o falla, también se describe si el modo de falla es oculto o no, se cuantifican los costos tanto operativos como de mantenimiento, donde se contemplaron también los posibles efectos contra la salud y el medio ambiente que la falla puede ocasionar.

En la Hoja de RCM se describen los efectos y consecuencias de cada modo de falla desde la columna 9 a la 16, dando respuesta así a la cuarta pregunta que propone la norma SAE JA012<sup>31</sup> ¿Qué sucede cuando se produce cada falla (efectos de la falla)? Ver anexo B. Hoja RCM

---

<sup>31</sup> THE ENGINEERING SOCIETY FOR ADVANCING MOBILITY LAND SEA AIR AND SPACE. Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC). SAE JA1012. USA: 2002. 62 p.p.

## 5.6 ANÁLISIS DE CRITICIDAD

¿Qué tan importante es cada falla en términos de consecuencias? Esta es la quinta pregunta que se aborda en el desarrollo de la metodología RCM. Para responder a esta pregunta, se ha utilizado un análisis de criticidad que considera diversos factores que podrían impactar significativamente las operaciones normales de la compañía.

A diferencia del análisis de criticidad realizado en el capítulo anterior para determinar los elementos críticos del sistema, en este análisis se evaluaron las consecuencias potenciales de cada modo de falla en relación con la afectación a las personas, medio ambiente, los costos y la imagen corporativa. Esta evaluación se basa en la probabilidad de que ocurra una falla. La tabla 7 ilustra la matriz de criticidad utilizada para el desarrollo de la metodología.

Tabla 7. Matriz de criticidad taller RCM

CONSECUENCIAS				CONSECUENCIA		PROBABILIDAD					
HUMANAS	AMBIENTALES	COSTOS	IMAGEN			IMPOSIBLE	IMPROBABLE	REMOTO	OCASIONAL	MODERADO	FRECUENTE
Mas de un muerto	Efectos irreversibles	>1M EUR	Internacional	Catastrofico	5						
Incapacidad permanente	Efectos irreversibles en menos de 2 años	ENTRE 100K - 1M EUR	Nacional	Severo	4						
Incapacidad temporal	Efectos reversibles en menos de 6 meses	ENTRE 10K - 100K EUR	Regional	Moderado	3						
Lesiones	Efectos pueden ser controlados	ENTRE 1K - 10K EUR	Local	Insignificante	2						
Ninguna	No afecta el medio ambiente	<1000 EUR	Ninguno	Ninguno	1						
						mayor a 10 Años	Menor a 10 Años	menor a 5 Años	menor a 2 Años	menor a 6 Meses	± 1 Mes
						A	B	C	D	E	F

En resumen, a través del análisis de criticidad se busca evaluar la importancia de cada falla en función de sus consecuencias. Esto permite tomar decisiones informadas sobre las medidas proactivas necesarias para evitar que la falla ocurra o de no ser posible, reducir los impactos negativos que esta pueda causar.

En la hoja RCM se evalúa cada uno de los aspectos ya mencionados. Ver anexo B. Hoja RCM.

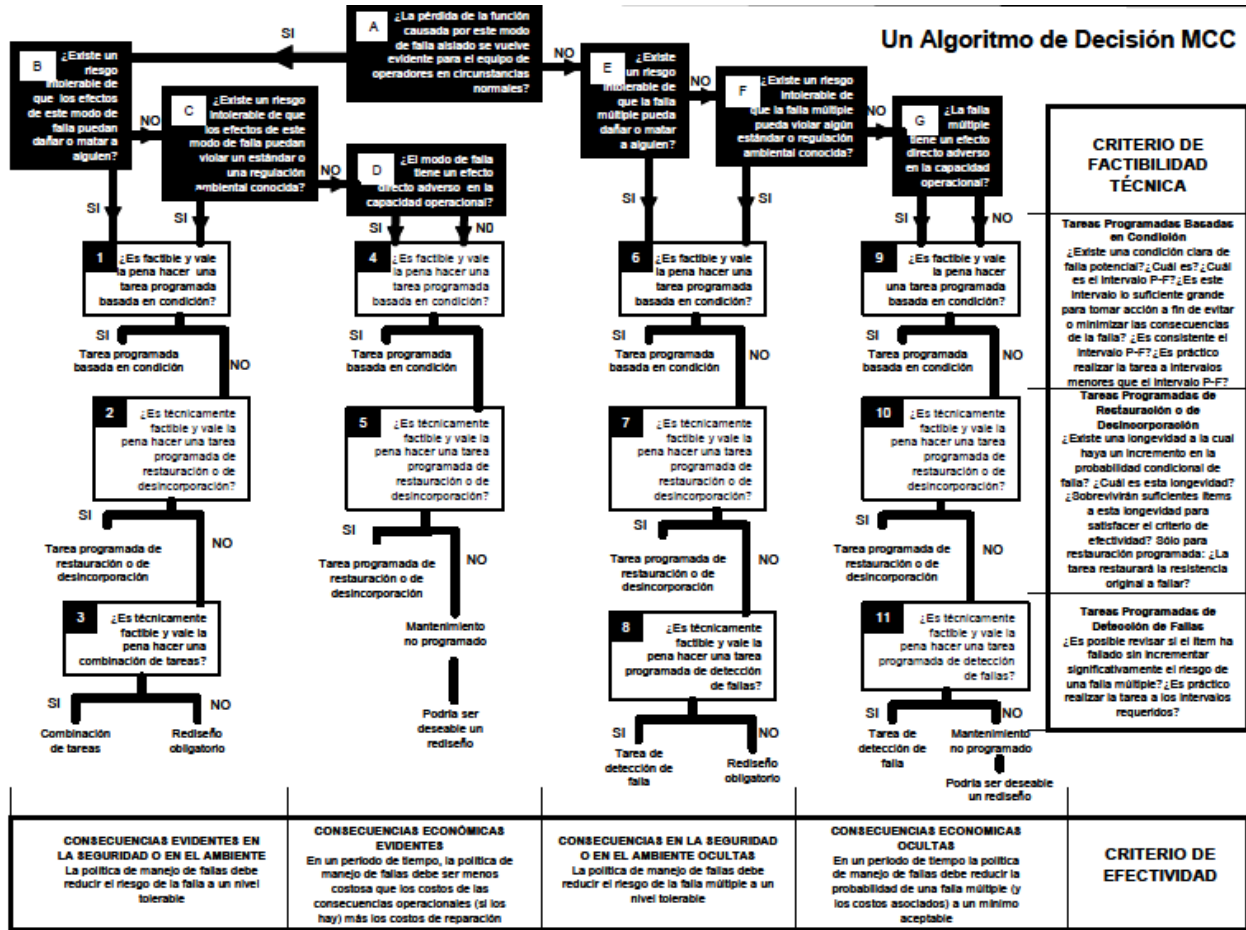
## **5.7 SELECCIÓN DE LAS TAREAS y FRECUENCIAS DE MANTENIMIENTO**

Para la selección de las tareas de mantenimiento fue fundamental la evaluación de los riesgos anteriormente mencionada con ayuda del análisis de criticidad. Se aplicó el segundo algoritmo de decisión propuesto por la norma SAE JA1012<sup>32</sup> y la selección de tareas y frecuencias de mantenimiento dieron respuesta la sexta y séptima pregunta que propone la metodología: ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada falla (tareas proactivas y sus intervalos)? Y ¿En caso no encontrarse una tarea para evitar la falla, que otra cosa puede hacerse? Ver figura 23

---

<sup>32</sup> THE ENGINEERING SOCIETY FOR ADVANCING MOBILITY LAND SEA AIR AND SPACE. Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC). SAE JA1012. USA: 2002. P. 54.

Figura 23. Segundo algoritmo de decisión propuesto por la norma SAE JA1012



Fuente: SAE JA1012

Las tareas seleccionadas fueron clasificadas en 6 tipos:

- Monitorizar (Tareas basadas en condición)
- Cambio (Tareas de desincorporación)
- Reacondicionamiento (Tareas de restauración)
- Correr a falla (Mantenimiento no programado)
- Pruebas funcionales o búsqueda de fallas
- Rediseño

Las frecuencias de mantenimiento seleccionadas se basaron en la probabilidad de ocurrencia de la falla y longevidad demostrada dentro de los años de operación del sistema, con el ánimo de garantizar que el intervalo mínimo sea lo suficientemente largo para que las acciones de mantenimiento sean técnicamente factibles.

## **5.8 PLAN DE MANTENIMIENTO PROPUESTO**

El plan de mantenimiento basado en la metodología RCM que arrojó el desarrollo de esta monografía se expone a continuación como una propuesta que generaría valor en la búsqueda de confiabilidad del sistema de recuperación de energía por medio de turbogeneradores.

Es una propuesta que involucra tareas de mantenimiento preventivo y predictivo, lo cual la hace una propuesta de carácter proactiva, cabe resaltar, como se mencionó anteriormente que un modelo basado en confiabilidad siempre está sujeto a la mejora continua y la retroalimentación basado en los resultados obtenidos y nuevos factores que afecten el sistema.

El modelo de plan propuesto puede verse en el anexo C. Plan de mantenimiento proactivo.

## **5.9 MANTENIMIENTO NO PLANEADO**

Durante el desarrollo del taller se plantearon modos de falla evidentes y no evidentes, para los cuales no fue posible encontrar una tarea programada apropiada, dado que no generaban consecuencias a la salud ni el medio ambiente, se consideró llevarlas a la falla, lo que representa la mejor solución costo-Efectiva sin consecuencias operacionales graves. Ver Anexo D. Mantenimiento No Planeado.

## **5.10 SUGERENCIAS DE REDISEÑO**

Como resultado de todo el desarrollo de la metodología se pudo determinar oportunidades de mejora, que contemplan en su totalidad un rediseño de las protecciones eléctricas del sistema de turbogeneradores ETC300, como se pudo apreciar en el diagrama de Pareto realizado anteriormente el 90% de las fallas ocurridas en el sistema equivalen a fallas por sobre corriente o sobre voltaje. Los posibles modos de falla en donde se recomienda un rediseño también pueden ser revisadas en la hoja RCM. Ver anexo E. Rediseño deseable.

Con las sugerencias de rediseño se da respuesta a la séptima pregunta que propone la metodología RCM. ¿Qué se haría si una tarea proactiva no puede desarrollarse (acciones por defecto)?

## **5.11 APRENDIZAJE Y RETROALIMENTACIÓN**

Es importante resaltar que durante el desarrollo del taller RCM existieron muchas dudas con respecto a la correcta definición de las funciones principales, secundarias, modos de falla y selección de tareas, por lo que se sostuvo una reunión con un especialista en RCM, quien aclaró de manera efectiva todos los interrogantes. Se considera importante plasmar esta experiencia en la monografía sobre algunos de los errores que se estaban cometiendo:

### **5.11.1 Mala definición de la función**

Para definir la función principal es importante ponerse en el lugar del elemento, a manera de ejemplo se pone una de las definiciones de función del módulo PE que fue corregida posteriormente, la función inicialmente decía “Abrir válvula de corte mediante el envío de señal de 24 VDC”, ya que el módulo PE realmente no es el que abre la válvula sino un actuador electroneumático, La función se corrigió y quedó “Enviar una señal de control de 0 o 24 VDC para abrir o cerrar la válvula de corte”.

### 5.11.2 Mala definición de falla funcional

En la descripción de las fallas funcionales no se pone el motivo de la falla, solamente la función que se perdió.

Para el mismo ejemplo anterior suponiendo que la definición de la función era correcta “Abrir válvula de corte mediante el envío de señal de 24 VDC”, la falla funcional errada fue “Válvula de corte no abre por baja tensión”, si se observa se escribió el motivo de la falla “baja tensión”, la correcta definición de la falla sería solamente “Válvula de corte no abre”.

### 5.11.3 Definición correcta de los modos de falla

Es importante aclarar que los modos de falla correspondientes a un elemento de estudio deben centrarse solamente en las partes o componentes de ese elemento en particular.

Un error que se estaba cometiendo con el elemento de estudio “turbogenerador” era asociarlo a problemas con la válvula reguladora, por ejemplo, para la falla funcional “El turbogenerador no genera energía”, el modo de falla erróneo era “Válvula de regulación con controlador de válvula quemado por sobretensión”.

Otro error cometido al momento de definir los modos de falla fue asociarlos directamente a la activación de un sistema de seguridad, por ejemplo, para la falla funcional “El turbogenerador no genera tensión”, se describió erradamente el modo de falla “Fusibles en el módulo PE se encuentran rotos”, resulta que esa es la función de los fusibles, por lo cual no representa un modo de falla. Una sugerencia de modo de falla recibida por el asesor fue “Turbogenerador quemado por sobre corriente al no activarse los fusibles de protección”.

## CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del taller RCM, específicamente en la taxonomía de equipos, se lograron identificar los sistemas principales y secundarios que componen el equipo de recuperación de energía.

Se logró definir las funciones principales y secundarias de los componentes del equipo de cogeneración que fueron seleccionados para el estudio, siguiendo la esencia de la metodología y las recomendaciones del director de monografía. En definitiva, se considera fundamental realizar una correcta definición de las funciones para garantizar el éxito de los pasos siguientes del desarrollo del taller RCM.

A través del desarrollo del taller RCM y el análisis exhaustivo de las fallas ocurridas, se lograron identificar las fallas funcionales del equipo de cogeneración y sus posibles modos de falla. Esto servirá de base para el cambio en la información a registrar en las órdenes de trabajo.

Se identificó que el 90% de las fallas que impactan directamente la disponibilidad del sistema de recuperación de energía se encuentran en el sistema eléctrico y de potencia. A través del análisis RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad), se ha desarrollado un plan de mantenimiento proactivo que aborda de manera preventiva el 55% de las fallas eléctricas registradas. El plan de mantenimiento se entrega como una propuesta que agrega valor en la búsqueda de confiabilidad del sistema de recuperación de energía.

## **RECOMENDACIONES**

Es importante considerar las sugerencias de rediseño resultantes del taller RCM para el sistema de protecciones eléctricas en el módulo de potencia.

Si en algún momento las condiciones del contexto operacional del equipo llevan a ser modificadas, es altamente recomendable reevaluar el plan de mantenimiento y aterrizarlo a las nuevas condiciones.

Para futuras mejoras del plan de mantenimiento se sugiere considerar los aprendizajes obtenidos en el desarrollo de la metodología por medio de la retroalimentación recibida de un asesor en RCM.

## BIBLIOGRAFIA

BANDA, Patricio; GUTIERREZ, Christian. Simulación de un Sistema Recuperador de Calor para Gases de Escape de Motogeneradores a Crudo. En: Revista Técnica “energía”. Enero, 2016, No 12, Pp. 230-238. ISSN 1390-5074.

BAUTISTA, Miguel; BERMEJO, Nory. Diseño de una estrategia de mantenimiento centrado en confiabilidad RCM para una turbina de gas General Electric LM6000PC en térmicas Ecopetrol GDA. Monografía Especialista en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica.2015. p.65.

BORRÁS, Carlos P. Mantenimiento Preventivo. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga: 2016. 82 p.p.

CIFUENTES, Willy René. Sistema de cogeneración para el ahorro de energía en la industria. Guatemala: Universidad de san Carlos de Guatemala. Facultad de ingeniería.2011. p.38

DÍAZ NAVARRO, Juan. Técnicas de mantenimiento industrial. España: Calpe Institute of Technology. 2007. p.2

GAVIRIA, Jorge E; MORA, Jorge H; AGUDELO, Jhon R. Historia de los motores de combustión interna. Revista facultad de ingeniería. Junio, 2002, nro 26, pp.68-78

GROSSO, Juan Carlos. Programa de mantenimiento basado en RCM para los hidrogenadores de la central la Guaca. Monografía Especialista en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica.2004. 117 p.p.

LOZANO, Miguel ángel; RAMOS, José. Recuperación óptima de calor en sistema de cogeneración con motores de combustión interna. En: VIII Congreso Nacional de Ingeniería Termodinámica. (19,20-21, junio, 2013: Burgos). Libro de Actas. pp. 859-868.

MORA, Luis A. Mantenimiento. Planeación, ejecución y control. México: Alfaomega Grupo Editor S.A, 2009. p.426.

MOUBRAY, John. Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad. New York: Industrial Press Inc, 1997. P. 5-6.

NAVSEA. Reliability Centered Maintenance (RCM) Handbook. Port Hueneme: Navsea, 2007. P.1-1.

NOWLAN, F Stanley; HEAP, Howard F. Reability-Centered Maintenance. San Francisco: United Airlines, 1978. 515 pp.

ORTÍZ, Daniel. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad – MCC – Guía Práctica. Bucaramanga: 2017. 33 pp.

QUISPE, Carlos. Análisis energético de un sistema de cogeneración con ciclo combinado y gasificación para la industria azucarera. Piura: Universidad de Piura. Facultad de ingeniería, Área departamental de ingeniería mecánico-Eléctrica. 2010. P.21.

SOSA, Maria Isabel; FUSHIMI, Alberto. La Cogeneración en el contexto de las tecnologías de conversión energética del futuro. La Plata: Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ingeniería, Departamento Mecánica. 2000. 6 p.p.

THE ENGINEERING SOCIETY FOR ADVANCING MOBILITY LAND SEA AIR AND SPACE. Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC). SAE JA1012. USA: 2002. 62 pp.

THE ENGINEERING SOCIETY FOR ADVANCING MOBILITY LAND SEA AIR AND SPACE. Criterios de evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado En Confiabilidad. SAE JA1011. USA: 1999. 12 pp.

## **ANEXOS**

“Los anexos están adjuntos y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS”