



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**GESTIÓN DE MANTENIMIENTO INTEGRAL EN TURBO GENERADOR DE 72  
MVA DE UNA ESTACIÓN CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE BUNKER**

**Soila Esperanza Guerra Sican**

Asesorado por el Msc. Ing. Ángel Enrique López

Guatemala, septiembre de 2017



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**GESTIÓN DE MANTENIMIENTO INTEGRAL EN TURBO GENERADOR DE 72  
MVA DE UNA ESTACIÓN CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE BUNKER**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**SOILA ESPERANZA GUERRA SICAN**

ASESORADO POR EL MSC. ING. ANGEL ENRÍQUE LÓPEZ FLORES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2017



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Ruiz Hernández
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Perez



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **GESTIÓN DE MANTENIMIENTO INTEGRAL EN TURBO GENERADOR DE 72 MVA DE UNA ESTACIÓN CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE BUNKER**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 2 de mayo de 2017.

**Soila Esperanza Guerra Sican**



FACULTAD DE  
INGENIERÍA - USAC  
ESCUELA DE  
ESTUDIOS DE POSTGRADO

Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Teléfono 2418-9142 / 2418-8000Ext. 86226

AGS-MIMPP-006-2017

Guatemala, 02 de mayo de 2017.

Director  
José Francisco González López  
Escuela de Ingeniería Eléctrica  
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación de la estudiante Soila Esperanza Guerra Sican con carné número 2005-12021, quien opto la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría de Ingeniería en Mantenimiento.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

"Id y Enseñad a todos"

MSc. Ing. Angel Enrique López Flores  
Asesor (a)

Dra. Inga. Alba Maritza Guerrero  
Coordinadora de Área  
Gestión y S.

ALBA MARITZA GUERRERO SPINOLA  
INGENIERA INDUSTRIAL  
COLEGIADA No. 4611

MSc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado



Cc: archivo/la

RESOLUCIÓN DE JUNTA DIRECTIVA: Proceso de Graduación Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011.



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística de su Proyecto de Graduación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: GESTIÓN DE MANTENIMIENTO INTEGRAL EN TURBOGENERADOR DE 72MVA DE UNA ESTACIÓN CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE BUNKER**, presentado por la estudiante universitaria SOILA ESPERANZA GUERRA SICÁN, considerando que el protocolo es viable para realizar el Diseño de Investigación procedo aprobarlo, ya que cumple con los requisitos establecidos por la Facultad de Ingeniería.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
Ing. Otto Fernando Andriano González  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica



Universidad de San Carlos  
de Guatemala

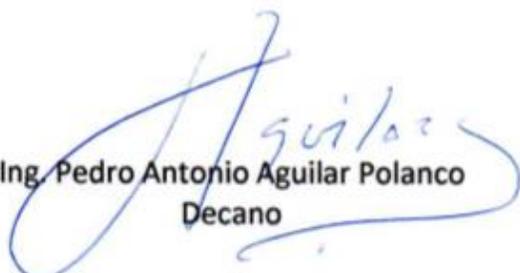


Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 421.2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **GESTIÓN DE MANTENIMIENTO INTEGRAL EN TURBO GENERADOR DE 72 MVA DE UNA ESTACIÓN CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE BUNKER**, presentado por la estudiante universitaria: **Soila Esperanza Guerra Sicán**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, septiembre de 2017

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Por permitirme la vida para concluir esta meta tan importante y ser mi amigo, mi guía y protector en todo camino.

### **Mis padres**

Maria Francisca Sican Patzán y Hector Rolando Guerra por ser los mejores padres que el mundo, y ser mi inspiración en cada día para ser mejor persona y que siempre se sientan orgullosos.

### **Mis hermanos**

Por ser siempre un ejemplo y un apoyo para mí, aunque la vida nos ha separado en distintos caminos, son diez regalos muy especiales de Dios, a los cuales amo mucho.

### **Mis tíos**

Carlos Sican Patzán. Por ser como un padre y estar siempre para apoyarme; Luis Eduardo Sican Patzan. El cual siempre recordare con mucho cariño y papá Dios tiene en su gloria.

### **Mis alumnos**

Con los cuales tuve el honor de compartir y que están en mi profunda estima y que siempre indiqué: aunque la faena fuera difícil no debíamos claudicar.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

- Al pueblo de Guatemala** Por subsidiar mi carrera a través de su trabajo y esfuerzo, al cual debo la oportunidad de mis estudios profesionales.
- Mis profesores** Por brindarme sus conocimientos y sabiduría que forjan mi carrera profesional; un especial agradecimiento al profesor Omar Argueta, Antonio Velásquez y Wilfredo Sirin
- Ing. Francisco González** Por ser partícipe de mi logro profesional, en gran medida por sus consejos y apoyo en tiempos difíciles, toda mi admiración y respeto.
- Ing. Luis Ortiz Peláez** Por ser uno de mis grandes modelos a seguir y por las oportunidades que me brindo para avanzar en mis estudios profesionales.
- Mis Asesores** Por apoyo y tiempo en la asesoría de mi documento de graduación al ing. Ángel López y el ing. William Pavón.
- Mis amigos** Por haberme apoyado, por hacerlo y porque sé que siempre lo harán en cada meta que emprenda en la vida.





# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
ANTECEDENTES.....	XXI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XXV
JUSTIFICACIÓN.....	XXIX
NECESIDADES A CUBRIR.....	XXXI
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Gestión de mantenimiento.....	1
1.1.1. Mantenimiento.....	2
1.1.2. Tipos de mantenimiento.....	4
1.1.2.1. Mantenimiento correctivo.....	4
1.1.2.2. Mantenimiento preventivo.....	4
1.1.2.3. Mantenimiento predictivo.....	5
1.1.3. Importancia de gestionar el mantenimiento.....	5
1.2. Estaciones Centrales Termoeléctricas.....	6
1.2.1. Tipos de centrales termoeléctricas.....	7
1.3. Centrales Termoeléctricas Convencionales.....	8
1.3.1. Elementos básicos de una central termoeléctrica convencional.....	9
1.3.2. La caldera.....	9

1.3.2.1.	Partes principales de la caldera .....	9
1.3.2.2.	Tipos de calderas .....	10
1.3.2.2.1.	Caldera piro-tubular .....	10
1.3.2.2.2.	Caldera Acu-tubular .....	11
1.3.3.	La turbina de vapor.....	12
1.3.3.1.	Consideraciones de seguridad en turbinas de vapor .....	14
1.3.4.	El generador eléctrico.....	15
1.3.4.1.	Aspectos constructivos .....	16
1.3.4.2.	Sistemas de excitación .....	18
1.3.4.3.	Protecciones para generadores de potencia.....	20
1.3.4.4.	Pruebas de integridad para generadores de potencia .....	26
1.3.5.	El condensador y sistema de condensado .....	28
1.3.6.	Sistema de bombeo de agua.....	29
2.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO DE INFORME.....	31
3.	METODOLOGÍA .....	33
3.1.	Diseño de la investigación.....	33
3.2.	Tipo de estudio.....	33
3.3.	Alcances .....	33
3.4.	Variables e indicadores .....	34
3.5.	Fases de la investigación .....	34
3.6.	Plan de muestreo .....	35
3.7.	Instrumentos para recolectar la información .....	35
4.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	37

5.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES PROPUESTO .....	39
6.	RECURSOS NECESARIOS Y FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	41
6.1.	Recursos físicos .....	41
6.2.	Recursos humanos.....	41
6.3.	Recursos Financieros .....	41
	BIBLIOGRAFÍA.....	43



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Central térmica convencional de carbón .....	7
2.	Esquema de una central termoeléctrica de vapor .....	8
3.	Partes principales de una caldera .....	10
4.	Detalle d la caldera pirutubular horizontal .....	11
5.	Detalle de caldera acuaturbular .....	12
6.	Turbina de vapor seccionada .....	13
7.	Sección de una turbina de vapor de condensación para altas potencias de operación .....	13
8.	Sección de una turbina de vapor de contrapresión para bajas potencias de operación .....	14
9.	Clasificación de fallas de la Turbina .....	15
10.	Máquina síncrona de baja potencia con el inducido en el rotor .....	16
11.	Tipos constructivos de máquinas síncronas .....	17
12.	Sistema de excitación con dinamo excitatriz .....	19
13.	Sistema de Excitación electrónico .....	19
14.	Condiciones anormales en generadores de potencia .....	20
15.	Diagrama de potencias para máquinas síncronas .....	22
16.	Curva típica y ajustes de un relevado de potencia para corrientes de secuencia negativa .....	24
17.	Curva de capacidad de una maquina síncrona de rotor cilíndrico .....	25
18.	Condensador de una central térmica .....	29
19.	Bombas verticales tipo lata con bajo NPSH requerido para servicio de condensado en plantas termoeléctricas de generación .....	30

## TABLAS

I.	Valores mínimos recomendados de índice de polarización para todas las clases de aislamiento de las maquinas según IEC 60085-01:1984 .....	27
II.	Diagrama de flujo de la investigación .....	39
III.	Fases de la investigación.....	40
IV.	Análisis de costos y factibilidad de la investigación .....	42

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>FMEA</b>	Análisis de efectos de modo de fallo
<b>HRSG</b>	Caldera de recuperación de calorina
<b>ca</b>	Corriente alterna
<b>cc</b>	Corriente continua
<b>Is</b>	Corriente de ajuste
<b>If</b>	Corriente de falla
<b>IN</b>	Corriente de neutro u homopolar
<b>IEC</b>	Comisión Electrotécnica Internacional
<b>RTD</b>	Detector de Temperatura Resistivo
<b>Hz</b>	Hertz (ciclos por segundo)
<b>HMI</b>	Human Machine Interface
<b>KA</b>	Intensidad en kiloamperio
<b>mA</b>	Intensidad miliamperio
<b>IEEE</b>	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
<b>DIN</b>	Instituto de normas alemanas
<b>ANSI</b>	Instituto Nacional Americano de Estándares
<b>RCM</b>	Mantenimiento Basado en la Confiabilidad
<b>BIL</b>	Nivel Básico de Aislamiento
<b>ISO</b>	Organización Internacional de Normalización
<b>MVA</b>	Potencia aparente Megavoltio-amperio
<b>MW</b>	Potencia real Megawatts
<b>N</b>	Régimen de giro de la turbina
<b>CTR</b>	Relación de transformador de corriente

<b>ASME</b>	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos
<b>KV</b>	Tensión en kilovoltio
<b>MTBF</b>	Tiempo medio entre fallas
<b>MTBCF</b>	Tiempo medio entre fallas crónicas
<b>MTTR</b>	Tiempo medio entre reparaciones
<b>CT</b>	Transformador de corriente

## GLOSARIO

- Álabe** es la paleta curva de una turbomáquina o máquina de fluido rotodinámica. Forma parte del rodete y, en su caso, también del difusor o del distribuidor. Los álabes desvían el flujo de corriente, bien para la transformación entre energía cinética y energía de presión por el principio de Bernoulli, o bien para intercambiar cantidad de movimiento del fluido con un momento de fuerza en el eje.
- Aislamiento Eléctrico** Es un material con escasa capacidad de conducción de la electricidad, utilizado para separar conductores eléctricos evitando un cortocircuito y para mantener alejadas del usuario determinadas partes de los sistemas eléctricos que de tocarse accidentalmente cuando se encuentran en tensión pueden producir una descarga.
- Caudal** En dinámica de fluidos, caudal es la cantidad de fluido que circula a través de una sección del ducto (tubería, cañería, oleoducto, río, canal) por unidad de tiempo. Normalmente se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo. Menos frecuentemente, se identifica con el flujo másico o masa que pasa por un área dada en la unidad de tiempo

<b>Comisionamiento</b>	Es un proceso enfocado a la calidad, para mejorar la entrega de un proyecto. El proceso se enfoca en la verificación y documentación de que las instalaciones y sus sistemas y ensamblajes están planificados, diseñados, instalados, probados, operados y mantenidos de tal forma de cumplir los Requerimientos del Dueño del Proyecto.
<b>Condensación</b>	es el cambio de estado de la materia que se encuentra en forma gaseosa (generalmente vapores) y pasa a forma líquida. Es el proceso inverso a la vaporización. Si se produce un paso de estado gaseoso a estado sólido de manera directa, el proceso es llamado sublimación inversa o deposición. Si se produce un paso del estado líquido a sólido se denomina solidificación.
<b>Corriente Electrica</b>	Es un proceso enfocado a la calidad, para mejorar la entrega de un proyecto. El proceso se enfoca en la verificación y documentación de que las instalaciones y sus sistemas y ensamblajes están planificados, diseñados, instalados, probados, operados y mantenidos de tal forma de cumplir los Requerimientos del Dueño del Proyecto.
<b>Eficiencia Energética</b>	Es una práctica que tiene como objetivo reducir el consumo de energía. La eficiencia energética es el uso eficiente de la energía, de esta manera optimizar

los procesos productivos y el empleo de la energía utilizando lo mismo o menos para producir más bienes y servicios.

**Eficiencia térmica**

Es la temperatura del foco caliente; es la temperatura del foco frío. La ecuación demuestra que se obtienen mayores niveles de eficiencia con un mayor gradiente de temperatura entre los fluidos calientes y fríos. En la práctica, cuanto más caliente el fluido, mayor será la eficiencia del motor.

**Transformador**

es un dispositivo que convierte la energía eléctrica alterna de un cierto nivel de tensión, en energía alterna de otro nivel de tensión, basándose en el fenómeno de la inducción electromagnética.



## RESUMEN

Aplicando la gestión de mantenimiento a una industria específica conlleva la implementación que permitan el análisis de los sistemas y procesos, prevención de fallas, ejecución de planes de mantenimiento, mitigación de la vulnerabilidad de los equipos y plan de acción para fallas no predecibles.

Para los efectos de la tesis se analizará el caso de una estación termoeléctrica de *bunker* que, durante la puesta en servicio, presentó fallas en su turbogenerador de potencia de 72 MVA de 13,8KV de 2 polos, trifásico, 3600 rpm con excitación independiente, fabricado en 1975 bajo la normativa ASTM-ANSI (1974), y estuvo 30 años fuera de servicio.

se propone tomar toda la información generada a partir de la falla como base para la creación de una propuesta de modelo de gestión de mantenimiento integral para el turbogenerador de 72 MVA de una estación central termoeléctrica de *bunker*, que permita la innovación del sistema de gestión del mismo, generando una planificación de los procesos que permitan una programación óptima de actividades y que formen el plan de mantenimientos preventivos y predictivos, tomando como principal factor las características operativas específicas de los equipos. Para esto se realiza el planteamiento metodológico y temático a seguir para la elaboración del modelo de gestión



# OBJETIVOS

## General

Elaborar un modelo de gestión de mantenimiento integral, de acuerdo con el análisis de una falla mayor, para un turbogenerador de potencia de una estación central termoeléctrica de bunker.

## Específicos

1. Establecer las condiciones técnicas-operativas óptimas para un turbogenerador de potencia de una central termoeléctrica, de acuerdo con el análisis de una falla mayor.
2. Plantear una estructura organizativa eficiente del departamento de mantenimiento de acuerdo al modelo de gestión integral.
3. Elaborar un plan de mantenimiento óptimo que se adecúe a las características propias del generador.



## INTRODUCCIÓN

La gestión de mantenimiento en la industria energética conlleva la implementación de etapas idóneas que permitan el análisis de los sistemas, prevención de fallas, ejecución de planes de mantenimiento, mitigación de la vulnerabilidad de los equipos y corrección de fallas imprevistas. El presentar los equipos gestionados una eficiencia de operación muy baja a la requerida, indica que una o varias de las etapas y puntos de control no están siendo efectivos, que el sistema de monitoreo se ha vuelto obsoleto o que este último es inexistente.

Para los efectos en investigación de este tipo de casos, se analizará el acaecido de una estación termoeléctrica de *bunker* que, durante la puesta en servicio, presentó fallas en su turbogenerador de potencia de 72 MVA de 13,8KV de 2 polos, trifásico, 3600 rpm con excitación independiente, fabricado en 1975 bajo la normativa ASTM-ANSI (1974), y estuvo 30 años fuera de servicio.

En un estudio posterior se determinó como causa principal de la falla una pérdida de propiedades del aislamiento en una de las fases del estator, generando pérdidas económicas y la reevaluación del diseño de sus equipos auxiliares. Así mismo se debieron revisar de forma específica los procedimientos y protocolos dictados para el funcionamiento inicial del turbogenerador, por lo que, en el presente documento, se propone tomar toda la información generada a partir de la falla como base para la creación de una propuesta de modelo de gestión de mantenimiento integral para el turbogenerador de 72 MVA de una estación central termoeléctrica de *bunker*,

que permita la innovación del sistema de gestión del mismo, generando una planificación de los procesos que permitan una programación óptima de actividades y que formen el plan de mantenimientos preventivos y predictivos, tomando como principal factor las características operativas específicas de los equipos. Para esto se realiza el planteamiento metodológico y temático a seguir para la elaboración del modelo de gestión:

El capítulo uno estará constituido por conceptos básicos de gestión de mantenimiento y del funcionamiento, estructura y tipo de configuraciones de centrales termoeléctricas con combustible base de *bunker*, así como todo tipo de turbogeneradores y sus equipos auxiliares. A su vez, este será el marco de referencia para realizar los planteamientos necesarios en la elaboración de la clasificación de los equipos críticos que estarán dentro del plan de mantenimiento.

En el capítulo dos se analizará la información recopilada de la falla del aislamiento en el turbogenerador del caso estudiado, con lo cual se pretende revisar los puntos críticos de control, las pruebas de estado de aislamiento del turbogenerador, las consideraciones técnicas en generadores antiguos y las condiciones de evaluación y mantenimiento previas a la puesta en servicio, tomando en cuenta las recomendaciones y prácticas aplicables según la normativa de IEEE.

El capítulo tres establecerá las prácticas y procedimientos adecuados de evaluación y revisión del turbogenerador, contemplado dentro de un plan de gestión de mantenimiento en fase inicial, realizando un análisis y clasificación de criticidad de equipos auxiliares, así como del propio turbogenerador, en que se establecerán los parámetros y límites críticos a considerar dentro de su

régimen de operación normal, así como la programación de sus mantenimientos preventivos según sus períodos de operación trimestral, semestral y anual.

Finalmente, en el capítulo cuatro se pretende organizar una estructura técnico administrativa básica a considerarse dentro de la compañía para manejo de personal técnico, y también manejo de *stock* de repuestos e insumos, presupuestos, cotizaciones y compras.



## ANTECEDENTES

Todo proyecto en el área de generación de energía eléctrica conlleva costos de inversión bastante elevados a nivel general, sin embargo, hay algunos equipos vitales que, al fallar, generan un mayor impacto en las finanzas iniciales y de operación del proceso, por lo que es necesario garantizar el funcionamiento óptimo, y toda empresa debe gestionar de forma integral sus operaciones. “El generador es el elemento más costoso del sistema, considerado tanto el costo de adquisición, como el costo que acarrea cualquier salida de trabajo, por ello en general se tiene que proteger más que cualquier otro aparato”. (Carrillo, 2007, p.3).

Para evitar costos inherentes a fallas en el generador, se deben tomar en cuenta los medios por los que se degrada el aislamiento de los devanados del estator, en la gama de tipos constructivos de generadores, por lo que se puede considerar que estos son afectados por las mismas variables críticas, como los son: la temperatura de operación, los esfuerzos mecánicos de arranques y paradas, además de las corrientes por sobreesfuerzos eléctricos. Otros factores a tomar en cuenta son la antigüedad de los equipos y las condiciones ambientales a las que son expuestos, que aumentan la posibilidad de fallas, por lo que estos también deben ser considerados en el análisis y pruebas preliminares que se ejecuten.

En el caso del turbogenerador bajo análisis, la coordinación de protecciones no fue revisada adecuadamente, provocando un daño de mayor impacto durante la falla en este y los equipos auxiliares del sistema de generación de energía. Esto indica que no se tomaron en cuenta algunos

estudios elementales antes de poner a funcionar la estación termoeléctrica. En relación a este tipo de fallas, Manzo (2005) afirma que:

“Para evitarse daños en los generadores y el sistema en que estos operan, se debe realizar el estudio de las protecciones eléctricas según la normativa de IEEE y verificar los rangos estándar que se aplican para las protecciones que debe llevar un generador, protocolos de pruebas y análisis de puesta en servicio, para que este trabaje bajo condiciones adecuadas.”

Para la evaluación del estado del aislamiento en turbogenerador de potencia, deben considerarse “las especificaciones de pasos y procedimientos que se deben ejecutar en una prueba diagnóstica de aislamiento de bobinados de generadores de potencia, así como los rangos de valores aceptables para este tipo de pruebas, que son normados internacionalmente por la IEEE” (Gupta, Stone & Stein, 2009).

Esparza & Ponce (2001) consideran:

“El análisis y evaluación actual de los valores adquiridos en diversas pruebas de diagnóstico en generadores de potencia registrados por la comisión federal de electricidad en la ciudad de México, donde se consideran los criterios de decisión según diagnóstico y comparativos respecto a la normativa de México y las regidas por IEEE”.

Estos autores evidencian la necesidad de realizar un diagnóstico del estado de los generadores y evaluarlos según los parámetros establecidos en el normativo internacional y en los internos, lo cual permitirá tener un criterio más amplio para la toma de decisiones en la gestión de los equipos.

Al generar un modelo de gestión integral se debe tomar en cuenta lo establecido por López & Ruiz (2002), quienes indican: “que los tipos, las revisiones específicas y consideraciones que se deben tomar en turbinas de

vapor para centrales termoeléctricas incluyen las prácticas adecuadas de inspección, valores permisibles, revisión de equipos auxiliares y parámetros a especificar, pruebas específicas a ejecutar, diagnóstico por paradas más comunes y sus posibles causas”. Además:

“En el estudio de las características y diferencias de los sistemas de información para la gestión de mantenimiento en la gran industria del estado de Zulia en Venezuela, se realizaron análisis de la industria y planteamientos de los sistemas de información para mantenimiento sintetizando que las industrias con mayor nivel de automatización muestran sistemas de información más organizados y con mejores posibilidades para el control de la gestión de mantenimiento.” (Arellano, López & Soler, 2015).

Las diferentes citas evidencian que, para generar un modelo de gestión de mantenimiento integral de un turbogenerador, se debe establecer un sistema de automatización de procesos, que permita implementar un sistema de administración orientado a alcanzar altos índices de disponibilidad, eficiencia y confiabilidad de la estación termoeléctrica.



## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para una planta de generación de energía eléctrica en Guatemala es fundamental tener valores de disponibilidad mayores al 90 %. La inexistencia de un plan de mantenimiento estructurado y automatizado, aunado a las fallas recurrentes ocasionadas en equipos, como lo son la vibración, temperatura, armónicos, desbalances de corriente y voltaje, desperfectos varios en equipos auxiliares, pueden generar valores de eficiencia y disponibilidad fuera de los estándares requeridos.

Se realizó el análisis de una falla específica en el comisionamiento y puesta en operación de un turbogenerador de 72100 KVA, en 13 800 V y un amperaje nominal de 3017 A, con factor de potencia de 0,85 de 3 600 rpm, 60 hertz y aislamiento clase B, antiguo, que estuvo fuera de operación durante 30 años. Se realizó un análisis cronológico de eventos listados a continuación:

De acuerdo a los alcances de los trabajos y pruebas de diagnóstico del estado de aislamiento y puesta en servicio inicial del turbogenerador en cuestión, según los informes previos, no se realizaron las pruebas de *hipot* y cortocircuito; y, de acuerdo al informe de la empresa responsable del procedimiento de revisión y limpieza de los devanados estáticos del generador con CO<sub>2</sub>, que corresponden a la aplicación de hielo seco a presión, se evidencia que se presentaron fugas de voltaje y bajo aislamiento en los devanados estáticos del generador. Aun así se continuaron los mantenimientos al rotor y excitatriz.

En la prueba de arranque y operación del generador donde se incrementó su excitación para aumentar el voltaje en pasos discretos de 1 000 Voltios hasta llegar al voltaje nominal correspondiente a 13,8 KV, al llegar al segundo paso (2 000 voltios) el voltaje se incrementó de forma súbita, indicando el informe que se llegó hasta el voltaje nominal. Derivado de ello se desarrolló una explosión en la celda del interruptor de potencia del generador y se observaron descargas eléctricas prominentemente visibles en los cojinetes del turbogenerador. Transcurrido un tiempo fuera de los rangos aceptables de una coordinación de protecciones, la turbina se dispara por acción de la protección diferencial del generador 87G.

Al realizar la evaluación de daños se registró que fueron afectados en la celda del interruptor de potencia del turbogenerador: los conectores, barras, accesorios, transformadores de corriente para medición y control, el capacitor supresor de transciendes y pararrayos de las fases L1 y L2 carbonizados y/o estallados, siendo estos daños secundarios al determinar que el turbogenerador presentaba daños severos en el aislamiento de la fase L3 del estator. De la revisión de las pruebas previas realizadas a la excitación del generador, se definió que algunas protecciones no se encontraban activas al momento del evento y se realizó el análisis del tiempo de repuesta del relevador del interruptor del generador correspondiente específicamente a la protección 86G.

Con base en el caso presentado, la falla produjo consecuencias directas y graves, ocasionando pérdidas económicas millonarias y meses de retraso en la actividad productiva de la empresa, todo ello derivado de la carencia de un programa de gestión adecuado de mantenimiento correctivo y preventivo de los equipos. Por ello, en el presente documento, se realizará una evaluación de la problemática presentada en la reactivación del turbogenerador de 72 MVA de una estación central termoeléctrica de *bunker* en Guatemala, con fines de

elaborar una propuesta de modelo de gestión integral de mantenimiento, hasta presentar un diseño de plan de mantenimiento y recursos requeridos para su implementación. A consecuencia de la problemática surge la siguiente interrogante:

¿Cómo elaborar con base en un análisis de caso de falla mayor, un modelo de gestión integral de mantenimiento específico para un turbogenerador de potencia de una central termoeléctrica de *bunker*?

Esta interrogante generó las siguientes preguntas específicas:

- a. ¿Qué condiciones técnicas operativas óptimas deben establecerse al realizar las pruebas de diagnóstico y de operación en el turbogenerador de la central termoeléctrica para reducir el riesgo de que se presente una falla?
- b. ¿Qué estructura organizativa del departamento de mantenimiento se debe proponer para que la propuesta de modelo de gestión sea eficiente?
- c. ¿Cuál es el plan de mantenimiento óptimo que se adecua a las características propias del generador?



## JUSTIFICACIÓN

En Guatemala existe escasez de documentos técnicos relacionados con la línea de investigación de administración del mantenimiento aplicado a la industria, por lo que generalmente se presentan fallas en equipos por la falta de implementación de programas de mantenimiento. De esto se deriva que, en ocasiones, algunos factores no son considerados en los diagnósticos, no se aplican matrices de riesgo o análisis causa-raíz y criticidad, ocasionando en algunos casos pérdidas millonarias en los proyectos por reposición o reparación de equipos, retrasos en la producción e incumplimiento de compromisos adquiridos por la empresa.

Con la finalidad de contribuir e innovar los sistemas de gestión de mantenimiento de la industria de generación de energía, se procederá a realizar un estudio característico de la puesta en servicio de un turbogenerador antiguo no operado durante más de tres décadas y que presentó una falla. Durante dicho análisis de causa-raíz se evaluarán los procesos, pruebas de diagnóstico y parámetros utilizados para poner en marcha el turbogenerador, identificando así los puntos de riesgo que no fueron tomados en cuenta. Esto dará la bases necesarias para elaborar una propuesta de un plan de gestión integral de mantenimiento del turbogenerador bajo análisis, que contenga elementos de buenas prácticas de mantenimiento, consideración de puntos críticos de control y rendimiento óptimo, así como de sus equipos auxiliares en una estación termoeléctrica típica. Este documento podrá ser utilizado como referencia para un ingeniero de planta, un jefe de área o un gerente de mantenimiento que esté elaborando o reestructurando el plan de mantenimiento de una industria de generación de energía eléctrica



## **NECESIDADES A CUBRIR**

Se planteará un modelo de gestión de mantenimiento aplicado a la industria de la energía en Guatemala, en que se abarque el tema de procedimientos y protocolos de puesta en operación, coordinación de protecciones y consideraciones técnicas-operativas para el turbogenerador de potencia en estudio. Todo eso con base en el análisis de los factores que desencadenaron una falla en un turbogenerador antiguo al ponerlo nuevamente en funcionamiento, sin tomar en cuenta que estuvo fuera de operación durante 30 años, lo cual generó pérdidas millonarias al proyecto.

Enmarcado en el departamento de mantenimiento como organismo técnico encargado del funcionamiento de los equipos, se pretende plantear estrategias y responsabilidades de mantenimiento, así como implementar los principales indicadores de rendimiento aplicados a esta industria, jerarquizar los equipos auxiliares y el turbogenerador de acuerdo a su criticidad, realizar un panorama de frecuencia y consecuencia para poder analizar puntos débiles como análisis de causa-raíz, para realizar procedimientos e inspecciones que puedan dar tendencias del estado operativo, aplicando así el concepto de mantenimiento basado en la condición.

Se elabora finalmente una propuesta de un plan de mantenimiento para el turbogenerador, y se presentan los recursos necesarios para su ejecución, generando las etapas básicas de la gestión integral, con base en la mejora continua asociada a las etapas de planificación, programación y ejecución del mantenimiento, con lo cual se presentará una propuesta innovadora en la

administración del mantenimiento para los actuales métodos de gestión utilizados en la industria.

# 1. MARCO TEÓRICO

En el tema de gestión de mantenimiento para una central termoeléctrica de *bunker*, se utilizaron como referencia dos puntos importantes a considerar: 1. La gestión de mantenimiento, modelos propuestos e importancia del mismo. 2. El estudio de las centrales termoeléctricas, sus equipos principales de operación, entre ellos el turbogenerador de potencia, haciendo una panorámica de los temas que abarca la investigación.

## 1.1. Gestión de mantenimiento

La gestión del mantenimiento es uno de los componentes administrativos al cual no se le ha dado importancia adecuada en la industria de producción energética, siendo considerado por algunos administrados como un gasto y no una inversión. Para tener una mejor idea del tema, se presenta a continuación algunos conceptos básicos, tales como: ¿qué es gestión de mantenimiento? ¿qué es mantenimiento?, y ¿cuáles son los tipos de mantenimiento?

La gestión en términos generales es el proceso de organizar, orientar, dirigir y controlar el uso de los recursos en un sistema productivo. Rodríguez (2008, p.2) define la gestión del mantenimiento cómo: “todas aquellas actividades de diseño, planificación y control destinadas a minimizar todos los costes asociados al mal funcionamiento de los equipos”. Viveros, et al. (2013), hace referencia a la gestión de mantenimiento de la siguiente forma:

“La moderna gestión del mantenimiento incluye todas aquellas actividades destinadas a determinar objetivos y prioridades de mantenimiento, las estrategias y las

responsabilidades. Todo ello facilita la planificación, programación y control de la ejecución del mantenimiento, buscando siempre una mejora continua y teniendo en cuenta aspectos económicos relevantes para la organización”.

García (n.d.), en su documento sobre organización y gestión del mantenimiento de instalaciones, en su conjunto de ideas, establece que la gestión de mantenimiento trata básicamente de la optimización de los recursos que se emplean, siendo el mantenimiento más que el solo reparar las fallas de que la producción le pudiera informar, debiendo existir una constante coordinación entre los diversos departamentos que componen el proyecto o empresa.

### **1.1.1. Mantenimiento**

Regularmente, en cualquier sistema productivo se hace referencia al mantenimiento de equipos y/o maquinarias, ya que al presentarse una falla en estos, se ocasionan cuantiosas pérdidas económicas no solo por los costos de reactivación o reposición de los mismos, sino también por los atrasos en la producción y cumplimiento de los compromisos adquiridos de una empresa. En tal sentido, el Servicio Nacional de Adiestramiento en Trabajo Industrial (SENATI, 2007), en la guía elaborada para el curso de mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo, define al mantenimiento como: “Todas las acciones necesarias para que un *ítem* sea restaurado o conservado asegurando su permanencia en funcionamiento regular de acuerdo con una condición especificada y cumplir el servicio requerido”. Siendo importante acotar que la gestión de mantenimiento óptima debe partir desde la planificación, adquisición e implementación de los equipos.

Por otra parte, Rodríguez (2008) establece que “el mantenimiento está compuesto por todas aquellas acciones que minimizan los fallos y reestablecen el funcionamiento del sistema cuando se produce un estado de fallo.” También García (2003, p.1), define el mantenimiento como: “el conjunto de técnicas destinado a conservar equipos e instalaciones en servicio durante el mayor tiempo posible (buscando la más alta disponibilidad) y con el máximo rendimiento”.

Las empresas se ven en la necesidad de evaluar cuáles han sido las técnicas o estrategias utilizadas para el mantenimiento de los equipos, en búsqueda de implementar un sistema que les permita reducir el que se presenten fallas en el funcionamiento de los equipos, lo cual se encamina a una reingeniería de los sistemas de mantenimiento que están utilizando. Tal es el caso que plantea Viveros, et al. (2013) en el artículo publicado en una revista chilena de ingeniería:

“El concepto base que da lugar a la ingeniería de mantenimiento es la mejora continua del proceso de gestión del mantenimiento mediante la incorporación de conocimiento, inteligencia y análisis que sirvan de apoyo a la toma de decisiones en el área del mantenimiento, orientadas a favorecer el resultado económico y operacional global”. Indicando en este mismo que: “la ingeniería de mantenimiento permite, a partir del análisis y modelado de los resultados obtenidos en la ejecución de las operaciones de mantenimiento, renovar continua y justificadamente la estrategia y, por consiguiente, la programación y planificación de actividades para garantizar la producción y resultados económicos al mínimo costo global. También permite la adecuada selección de nuevos equipos con mínimos costos globales en función de su ciclo de vida y seguridad de funcionamiento (costo de ineficiencia o costo de oportunidad por pérdida de producción)”.

## **1.1.2. Tipos de mantenimiento**

Para implementar un modelo de gestión de mantenimiento es necesario tomar en cuenta los tipos de mantenimiento básicos, los cuales son definidos por Rodríguez (2008, págs. 2 y 3) de la siguiente forma:

### **1.1.2.1. Mantenimiento correctivo**

“Se llama mantenimiento correctivo a toda actividad que se realiza para establecer un equipo o instalación cuando ha entrado en estado de fallo. Es el mantenimiento apropiado en máquinas de baja repercusión en el sistema, dado que, de este modo, sólo se emplean recursos cuando se produce el problema”. (Rodríguez, 2008, págs. 2 y 3).

### **1.1.2.2. Mantenimiento preventivo**

“El mantenimiento preventivo busca evitar averías mediante la realización de intervenciones que disminuyen la probabilidad de fallo, y de este modo aumentan la fiabilidad de la instalación.

“Las intervenciones se pueden realizar de forma periódica o sistemática, y según el estado del componente o condicional, siendo esto último lo recomendable, al evitar sustituciones innecesarias, y por tanto, desperdicios. Como el mantenimiento preventivo no evita la aparición de fallos, su implantación y frecuencia responde a un balanceo de costes, donde se aplicará este sistema cuando los gastos en los que se incurre en cada intervención sean inferiores a los que se evitan con ellas”.

(Rodríguez, 2008, págs. 2 y 3).

### **1.1.2.3. Mantenimiento predictivo**

“El mantenimiento predictivo recurre al seguimiento del funcionamiento de las máquinas para determinar cuándo y dónde se puede producir el fallo y de este modo anticiparse y evitar su aparición.

“Aunque elimina intervenciones innecesarias, el elevado número de recursos que requiere la realización del seguimiento de los diferentes parámetros, y por tanto, su elevado coste, sólo lo hace apropiado en instalaciones con un elevado coste de mantenimiento que resulten críticas en el sistema productivo”. (Rodríguez, 2008, págs. 2 y 3).

### **1.1.3. Importancia de gestionar el mantenimiento**

García (2003, págs.3 y 4) contempla de forma integral las razones de por qué es necesario implementar sistemas de gestión de mantenimiento, siendo estas las siguientes:

1. “Porque la competencia obliga a rebajar costes. Por tanto, es necesario optimizar el consumo de materiales y el empleo de mano de obra. Para ello es imprescindible estudiar el modelo de organización que mejor se adapta a las características de cada planta; es necesario también analizar la influencia que tiene cada uno de los equipos en los resultados de la empresa, de manera que dediquemos la mayor parte de los recursos a aquellos equipos que tienen una influencia mayor; es necesario, igualmente, estudiar el consumo y el *stock* de materiales que se emplean en mantenimiento; y es necesario aumentar la disponibilidad de los equipos, no hasta el máximo posible, sino hasta el punto en que la indisponibilidad no interfiera en el planta de producción.
2. Porque han aparecido multitud de técnicas que es necesario analizar para estudiar si su implantación supondría una mejora en los resultados de la empresa, y para estudiar también cómo desarrollarlas, en el caso de que pudieran ser de aplicación.

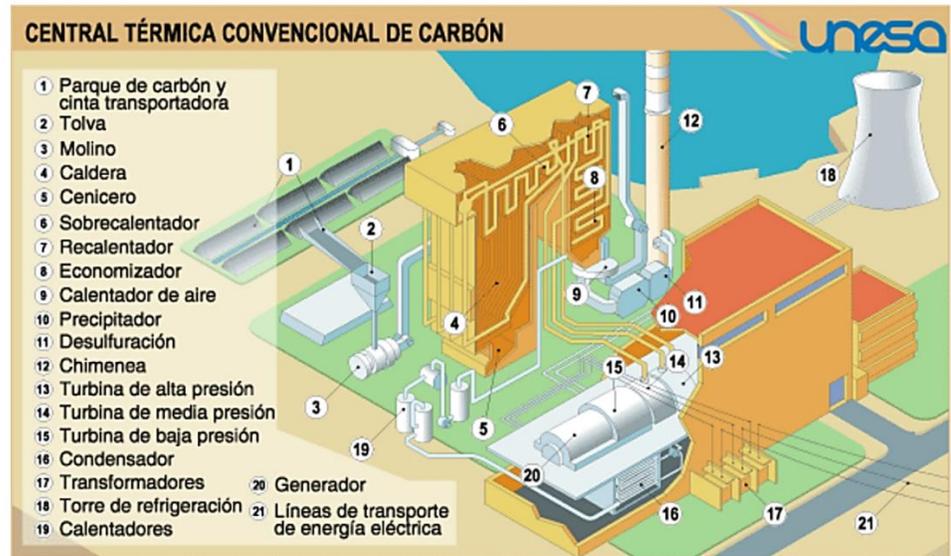
3. Porque los departamentos necesitan estrategias, directrices a aplicar, que sean acordes con los objetivos planteados por la dirección.
4. Porque la calidad, la seguridad, y las interrelaciones con el medio ambiente son aspectos que han tomado una extraordinaria importancia en la gestión industrial. Es necesario gestionar estos aspectos para incluirlos en las formas de trabajo de los departamentos de mantenimiento”.

## **1.2. Estaciones Centrales Termoeléctricas**

El uso de este tipo de centrales se refiere a su bajo costo de implementación y alta rentabilidad, aprovechando la energía calorífica de un combustible, que puede ser fósil, gas natural u otros, para generar energía eléctrica a través de un proceso de transformación de energía calorífica a mecánica y posteriormente a energía eléctrica.

El proceso de la transformación de la energía corresponde a los siguientes pasos: “a) La energía contenida en el combustible se transforma por combustión en energía calorífica. b) La energía calorífica que absorbe el fluido de trabajo se convierte al expansionarse en la turbina o motor en energía mecánica. c) La energía mecánica es transformada en energía eléctrica a través del generador eléctrico. El ciclo Rankine es el ciclo termodinámico que se emplea en las centrales térmicas de vapor”. (Fernández Ramírez & Robles Días, 2012, p. 3).

Figura 1. Central térmica convencional de carbón



Fuente: Asociación Española de la Industria Eléctrica.

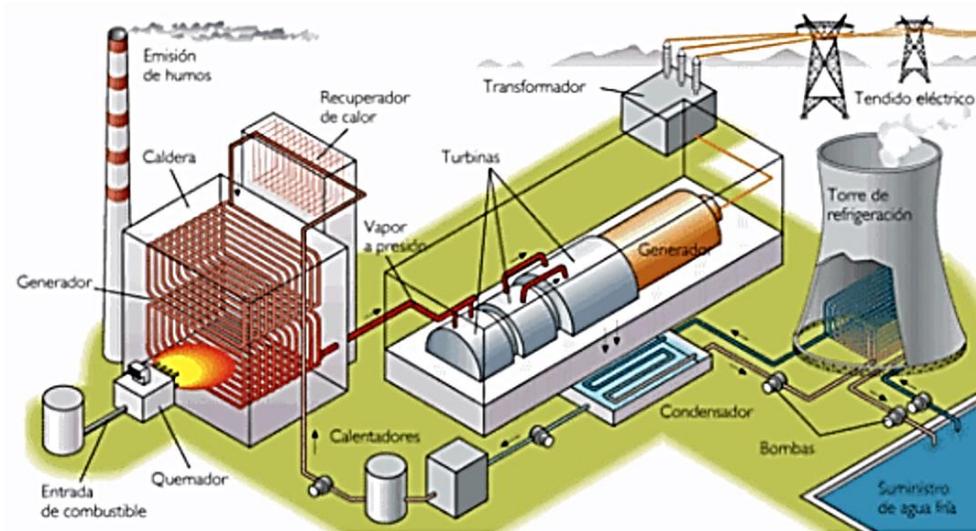
### 1.2.1. Tipos de centrales termoeléctricas

Las centrales térmicas se diferencian una de otra según el tipo de combustible y la naturaleza del mismo. Estas pueden ser: 1) Centrales termoeléctricas convencionales que utilizan generalmente combustibles fósiles. 2) Centrales termoeléctricas de gas natural, cambiando la configuración de sus equipos propios. 3) Centrales termoeléctricas de ciclo combinado gas y vapor que combinan ambos ciclos termodinámicos para mejorar rendimiento y eficiencia. Para los fines de estudio se abordará el tema de las centrales termoeléctricas convencionales, así como sus equipos auxiliares aplicados a estaciones centrales termoeléctricas de bunker finalmente.

### 1.3. Centrales Termoeléctricas Convencionales

“En las centrales térmicas de vapor se utilizan como máquinas motrices las máquinas de vapor, o las turbinas de vapor o, en algunos casos, ambos tipos de máquinas; además de accionar los generadores eléctricos principales, en las centrales térmicas de vapor, también se utilizan las máquinas anteriormente citadas, para el accionamiento de equipos auxiliares, tales como bombas, hogares mecánicos, ventiladores, excitatrices, etc. El vapor necesario para el funcionamiento de las máquinas motrices, se produce en calderas, quemando combustible en los hogares que forman parte integrante de las propias calderas; desde estas, el vapor se conduce por medio de canalizaciones hasta las máquinas o las turbinas de vapor”. (Fernández Ramírez & Robles Días, 2012, p. 5)

Figura 2. Esquema de una central termoeléctrica de vapor



Fuente: Gonzáles Chávez. 2015, p. 14.

### **1.3.1. Elementos básicos de una central termoeléctrica convencional**

Los principales elementos de una central termoeléctrica inciden en varios sistemas. Los más importantes son: la caldera, la turbina de vapor, el generador eléctrico, el condensador, el sistema de condensado y, por último, el sistema de bombeo. (González Chávez, 2015, p. 14)

### **1.3.2. La caldera**

“Se denomina caldera al recipiente en que se calienta el agua para convertirla en vapor. Por extensión, se conoce también con este nombre, no solamente dicho recipiente, sino también los elementos anexos tales como el hogar donde se quema el combustible que produce el calor necesario, los conductos de humos de combustión, los calentadores de aire de combustión, los economizadores de agua de alimentación, los recalentadores de vapor, etc. Es decir que se denomina caldera a todo sistema a presión en el que el agua se transforma en vapor, como producto final, por cesión de calor de una fuente a temperatura superior”. (Fernández Ramírez, & Robles Días, 2012, p.8).

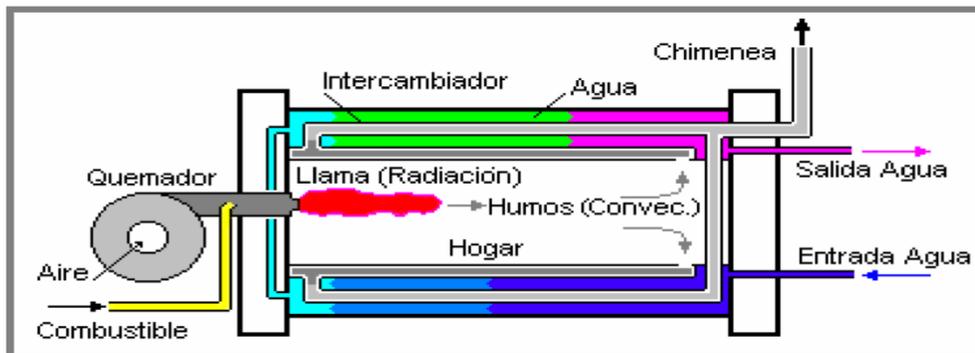
Dentro de los puntos críticos de control en una caldera se cita la calidad y clase de combustible, la cantidad de aire suministrado al hogar por medio de los ventiladores de tiro forzado y tiro inducido, dependiendo de la constitución de la caldera y de la superficie de calefacción, así como la presión de vapor que se maneja, como indican Fernández Ramírez y Robles Días.

#### **1.3.2.1. Partes principales de la caldera**

Dentro de las partes importantes de la caldera se hace referencia a los siguientes componentes: el hogar de la caldera, el sistema de quemadores que dependen del tipo de combustible a utilizar, el sistema de manejo de humos y

residuos de la combustión, como lo sería en el caso de manejo de cenizas para una caldera de carbón, el sistema de intercambio de calor, el sistema de agua y la chimenea. (Renedo, n.d.).

Figura 3. Partes principales de una caldera



Fuente: Renedo., (n.d.).

### 1.3.2.2. Tipos de calderas

La clasificación de las calderas puede realizarse de varias maneras dependiendo de sus características a considerar. En el presente documento adoptaremos la clasificación según la disposición de los fluidos:

#### 1.3.2.2.1. Caldera pirotubular

“Son aquellas calderas en las que los gases de combustión circulan por el interior de los tubos y el líquido se encuentra en un recipiente atravesado por dichos tubos. Son de aplicación principalmente cuando la presión de trabajo es inferior a los 22bar”. (Consejería de Economía y hacienda, 2013, p.73). De acuerdo a lo citado, las indicaciones y ventajas de este tipo de caldera corresponden a “el vapor producido por las mismas suele tener un título de vapor cercano al 1, es decir, que el contenido de agua por unidad de masa es

bajo (3%), no siendo necesario instalar equipos auxiliares complementarios. Las exigencias de la calidad del agua de alimentación son menores a las requeridas por las calderas acuatubulares”. (Consejería de Economía y hacienda, 2013, p.73).

Figura 4. **Detalle d la caldera pirutubular horizontal**



Fuente: Consejería de Economía y hacienda, 2013, p.73.

#### **1.3.2.2.2. Caldera Acuatubular**

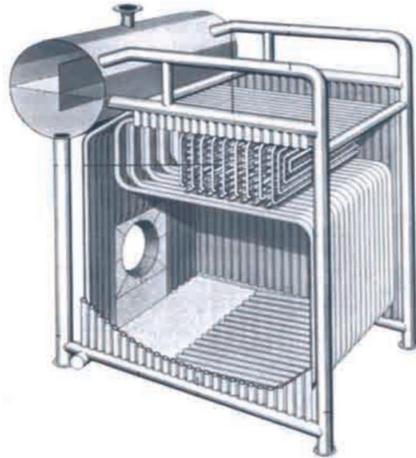
Consejería de Economía y Hacienda (2013) define las calderas acuatubulares como:

“Aquellas calderas en las que el fluido de trabajo se desplaza por el interior de tubos durante su calentamiento y los gases de combustión circulan por el exterior de los mismos. Son de aplicación cuando se requiere una presión de trabajo por encima de los 22bar.

“En el caso de las calderas de vapor, el título de vapor es muy bajo (0,85), es decir, que el contenido de agua por unidad de masa es muy alto (15 %) si no se les añade subconjuntos secadores de vapor, tales como recalentadores o sobrecalentadores.

“Las exigencias de la calidad del agua de alimentación de estas calderas, suele ser superior al requerido para otro tipo de calderas. (Consejería de Economía y Hacienda, p.71 y 72).

Figura 5. **Detalle de caldera acuotubular**



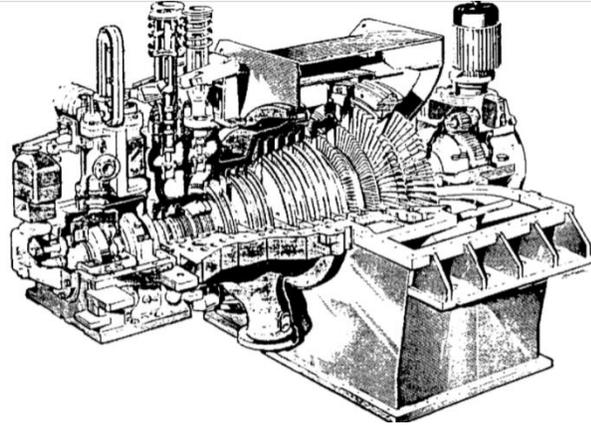
Fuente: Consejería de Economía y Hacienda, 2013, p.72.

### **1.3.3. La turbina de vapor**

Una de las definiciones para la turbina de vapor es:

“Es una turbomáquina motriz (rotodinámica) compuesta por un sistema rotórico, en el que el vapor se expande e intercambia su momento de cantidad de movimiento, produciendo así potencia mecánica en su eje. La turbina de vapor está dividida por un determinado número de escalonamientos, el rotor está compuesto por una serie de coronas de alabes, uno por cada escalonamiento de la turbina. Los alabes se encuentran unidos solidariamente al eje de la turbina en el conjunto rotor, produciendo un cambio de *momentum* angular aprovechado en su eje como potencia mecánica”. (Gonzales, 2015, p. 35)

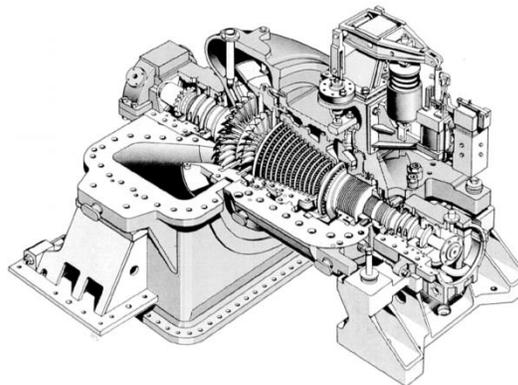
Figura 6. **Turbina de vapor seccionada**



Fuente: Gonzáles Chávez. 2015, p.36.

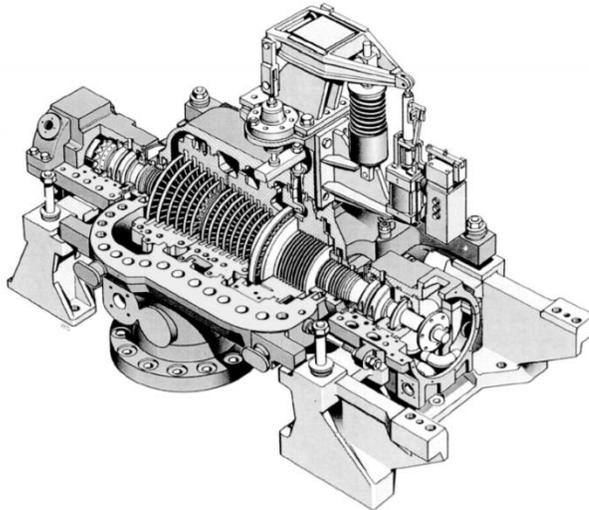
Como características importantes para clasificar las turbinas de vapor se debe considerar que sus características constructivas dependen de la potencia de la central termoeléctrica, como afirma Gonzales Chávez en *Centrales termoeléctricas y plantas de cogeneración* (2015, p. 53), siendo generalmente las turbinas de vapor de condensación para altas potencias como las de contrapresión para bajas potencias.

Figura 7. **Sección de una turbina de vapor de condensación para altas potencias de operación**



Fuente: Gonzáles Chávez. 2015, p. 53.

Figura 8. **Sección de una turbina de vapor de contrapresión para bajas potencias de operación**



Fuente: Gonzáles Chávez. Centrales termoeléctricas y plantas de cogeneración. 2015, p. 54.

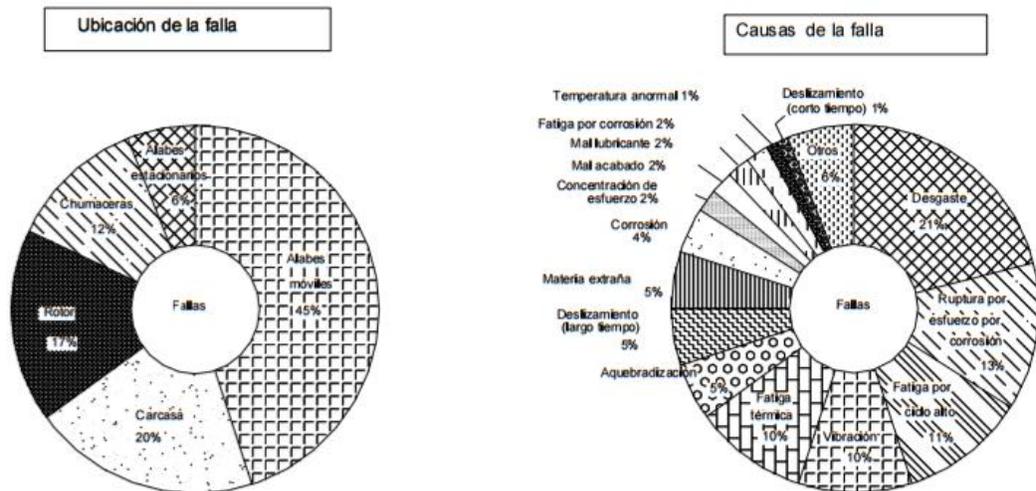
### **1.3.3.1. Consideraciones de seguridad en turbinas de vapor**

Para fines de mantenimiento se deben considerar los puntos críticos de control que deben existir en las turbinas de vapor para grandes potencias, y considerarlas dentro de la gestión de mantenimiento, en rutinas de inspección y control.

“Existen ciertas condiciones de operación que deben ser evitadas por las turbinas por su alto grado de riesgo como son las vibraciones, velocidad excesiva de giro, bajo vacío, operar sin lubricación, excesivo desplazamiento axial, alto nivel en los calentadores de alta y baja presión y otras más. Es por eso que las turbinas cuentan con las siguientes protecciones: disparo por bajo vacío, por alto nivel en el calentador de alta presión y baja presión, por selenoide, por altas vibraciones, por sobrevelocidad. La protección de sobrevelocidad cuando por cualquier causa a una turbina de vapor se le disminuye la carga en forma repentina, tenderá a aumentar su velocidad de rotación, hasta valores muy altos, que podrían en peligro las partes de que está formada, e

inclusive ocasionar su destrucción total. Para evitar daño se han diseñado los dispositivos de "sobrevelocidad" los cuales, mediante mecanismos, al alcanzar la turbina una velocidad predeterminada, cierran en forma momentánea la válvula de admisión de vapor, llamada de cierre rápido, haciendo que la turbina se pare. Este dispositivo de sobrevelocidad se calibra para que opere generalmente con una velocidad de 10 a 15 % mayor que la velocidad de trabajo". (López del Ángel y Ruiz Reyes, 2002, p. 25)

Figura 9. Clasificación de fallas de la Turbina



Fuente: López del Ángel y Ruiz Reyes. (2002). Inspección de integridad para turbinas de vapor en centrales termoeléctricas, p.13.

### 1.3.4. El generador eléctrico

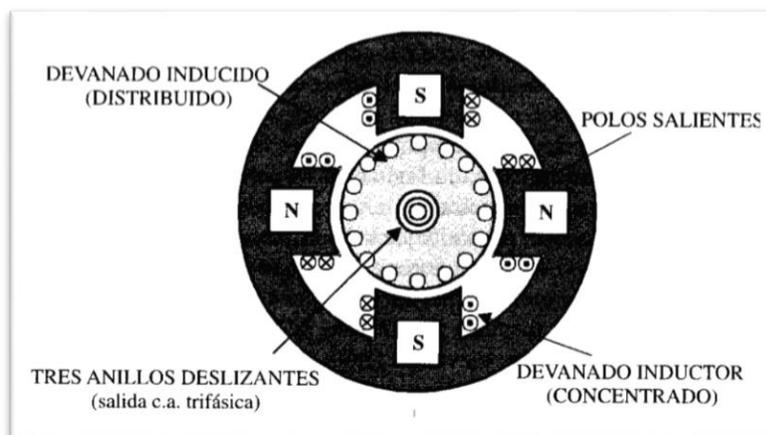
El generador eléctrico, en su definición más básica, corresponde a una máquina síncrona, siendo estas conceptualizadas por Fraile Mora de la siguiente forma:

“Las máquinas síncronas, como cualquier otro convertidor electromecánico de la energía, están sometidas al principio de reciprocidad electromagnética, pudiendo funcionar tanto en régimen generador como en el régimen motor. Sin embargo, en la práctica de las instalaciones eléctricas es más frecuente su empleo como generadores, para producir energía eléctrica de corriente alterna (alternadores) en las centrales eléctricas a partir de fuentes primarias de energía hidráulica, térmica o nuclear”. (Fraile Mora, 2003, pág. 381)

#### 1.3.4.1. Aspectos constructivos

“Las maquinas eléctricas, como lo es la máquina síncrona, de igual manera está constituida por bobinados para formar los campos magnéticos, siendo estos: a) Un devanado inductor, construido en forma de arrollamiento concentrado o bien distribuido en ranuras, alimentado por corriente continua, que da lugar a los polos de la máquina. b) Un devanado inducido distribuido formando un arrollamiento trifásico recorrido por corriente alterna”. (Fraile Mora, 2003, p. 383).

Figura 10. **Máquina síncrona de baja potencia con el inducido en el rotor**

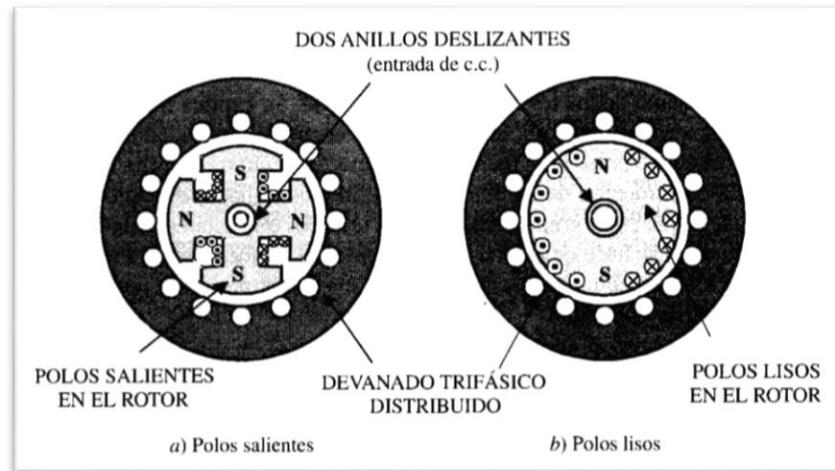


Fuente: Fraile Mora, J. 2003, p.383.

Dentro de los aspectos constructivos más importantes en las máquinas síncronas de gran potencia se encuentra el rotor, siendo este del tipo de polos

salientes o polos lisos, de dos a cuatro polos magnéticos generalmente, y los polos estarán en el rotor y los devanados trifásicos en el estator, tal como lo describe Fraile Mora.

Figura 11. **Tipos constructivos de máquinas síncronas**



Fuente: Fraile Mora. 2003, p.384.

Para fines del estudio se enfatizará la aplicación de rotores para turbogeneradores de potencia de centrales termoeléctricas convencionales de vapor, las cuales están descritas por Fraile Mora (2003) en su libro *Máquinas eléctricas* de la siguiente forma:

“A este respecto se puede decir que la elección entre ambos tipos viene impuesta por la velocidad de rotación de la máquina, la cual depende a su vez del tipo de motor primario que la hace girar, y así, se distinguen los turbogeneradores, hidrogeneradores y los generadores diesel.

“Los turbogeneradores están movidos por turbinas de vapor, las cuales tienen gran rendimiento si se mueven a velocidades elevadas. Estos alternadores tienen un rotor cilíndrico, devanado generalmente para dos polos, lo que corresponde a una velocidad síncrona, de 3.000 r.p.m. a 50 Hz. El eje turbina-alternador es horizontal y se construyen unidades con potencias de 1.000 MVA...

“Como quiera que la potencia asignada en una máquina es proporcional a su volumen, los turbogeneradores, al ser de gran velocidad, se construyen con un pequeño diámetro y una gran longitud axial, y de esta forma se reducen las fuerzas centrífugas a que están sometidos los devanados del rotor.

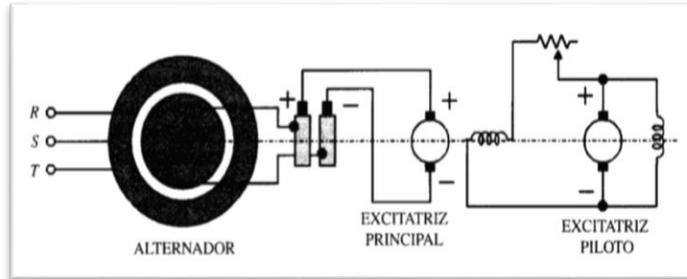
“Las tensiones generadas por los alternadores no superan los 15 kV para potencias inferiores a 200 MVA; para potencias superiores a las tensiones se elevan a 25-30 kV con objeto de reducir el volumen de cobre empleado en la construcción del inducido. Las corrientes de cada fase pueden llegar a 20 kA, por lo que es imprescindible la utilización de devanados con circuitos en paralelo. Las corrientes de excitación pueden alcanzar los 2,5 kA a 1 kV para generadores de 750 MVA. Las pérdidas que estas corrientes producen por su efecto Joule en los devanados deben evacuarse de una forma adecuada para evitar dañar los aislamientos”. (Fraile Mora, 2003, págs. 384-385)

Las pérdidas de potencia en los turbogeneradores pueden representar valores considerables de energía calorífica que se libera en todo el sistema, por lo que, en grandes unidades de generación, se utilizan sistemas de enfriamiento para los bobinados estáticos que pueden ser de agua o hidrógeno, siendo el hidrógeno el más conveniente por sus características de transferencia de calor y la ausencia de oxígeno, que no degrada el aislamiento del bobinado (Fraile Mora, 2003).

#### **1.3.4.2. Sistemas de excitación**

“La excitatriz es un generador de c.c. convencional, en el que a veces se sustituye toda o parte de su excitación por una excitatriz piloto con objeto de mejorar la rapidez de repuesta”. (Fraile Mora, 2003, p. 386).

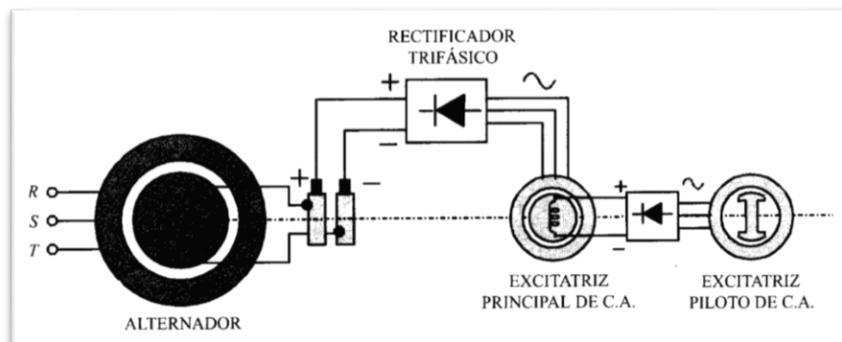
Figura 12. **Sistema de excitación con dinamo excitatriz**



Fuente: Fraile Mora. 2003, p. 386.

Como punto importante también establece Fraile Mora que la excitatriz para un generador de potencia con dinamo, generalmente ha sido sustituida, debido a la dificultad de mantenimiento y rapidez de conmutación que corresponde a máquinas de corriente continua convencionales. En los generadores de alta velocidad se han sustituido estas por las excitatrices de corriente alterna que utilizan sistemas de rectificación de voltaje con electrónica de potencia, utilizando tiristores de silicio generalmente, para generar el campo de corriente continua que alimenta los polos en el rotor, siendo el más utilizado el de doble generación de corriente continua utilizando imán permanente, como se muestra en la figura 13:

Figura 13. **Sistema de Excitación electrónico**

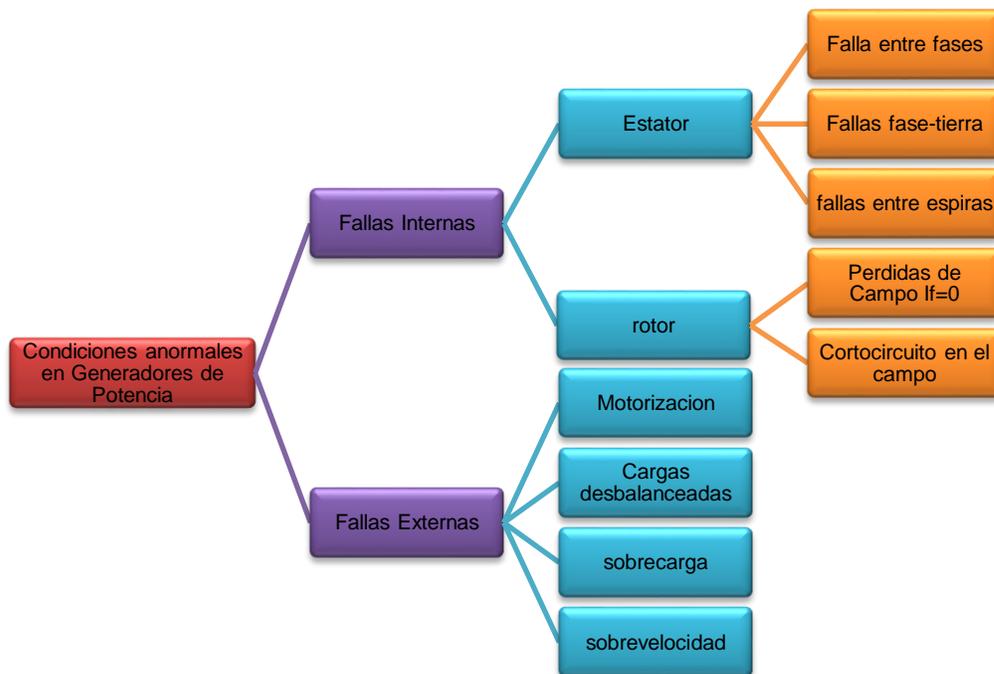


Fuente: Fraile Mora. 2003, p.387.

### 1.3.4.3. Protecciones para generadores de potencia

Dentro del marco de estudio y análisis de la falla en el turbogenerador, Carillo Caicedo (2007) cita las condiciones anormales más comunes en un generador de potencia, por lo cual se hará referencia a las protecciones básicas para este tipo de anomalías operativas que pueden darse en los turbogeneradores de potencia.

Figura 14. Condiciones anormales en generadores de potencia



Fuente: Elaboración propia

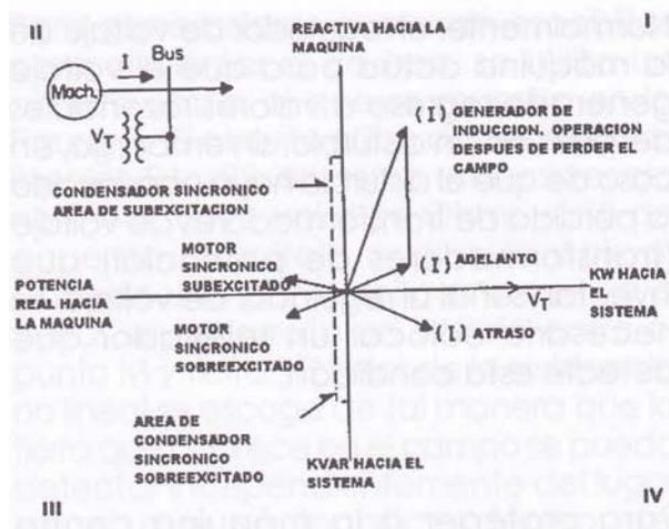
Existen diversos tipos de protecciones para generadores de potencia. Se citarán a continuación algunos de los más importantes para fines del estudio de investigación. Indica Caicedo (2007) que dentro de las consideraciones más importantes que deben tenerse está que, al presentarse una falla interna, la

acción a tomar no corresponde a la apertura de su interruptor de potencia únicamente, sino que debe desconectarse la alimentación a la excitatriz del mismo.

- a. La falla entre fases: se debe al daño del aislamiento entre bobinados de las fases del estator, generando corrientes muy grandes y dañinas para el generador. Para este tipo de falla se utilizan los CTs y los relés de protección diferencial, como indica Caicedo (2007, p. 180): “al detectar una falla entre fases, es imperativo que la unidad se dispare sin retardo, usando un disparo simultaneo (turbina, interruptor de campo e interruptor de potencia)”.
- b. La falla de fase-tierra: corresponde a la falla que se produce entre uno de los bobinados de las fases y tierra. “El método usual de detección es por un relé de voltaje a lo largo de una resistencia a tierra. Un relé de corriente se usa algunas veces en lugar de un relé de voltaje, o como respaldo. El relé debería tener un nivel de detección a la frecuencia de línea tan baja como sea posible para reducir la zona desprotegida en el extremo neutro de los devanados.” (Caicedo, 2007, p. 182)
- c. La falla entre espiras: es un tipo de falla que se da entre las espiras de un mismo devanado y es difícil de visualizar. “Este tipo de fallas no se detecta con la protección diferencial longitudinal, puesto que la corriente de entrada es igual a la de salida, por ello su protección debe ser especial”. (Caicedo, 2007, p. 184). En este caso se utiliza un tipo de relé de protección diferencial transversal.
- d. La falla a tierra en el devanado del rotor: “el devanado del campo del generador esta eléctricamente aislado de tierra. Por lo tanto, la existencia de una falla a tierra en el devanado no dañara el rotor.” (Caicedo, 2007, p. 186). Por lo tanto, se utiliza un relé de protección de falla a tierra en el campo.

- e. La pérdida de excitación donde  $I_f=0$ : “en operación normal, el generador opera en el cuadrante IV y cuando el generador pierde el campo, se traslada a operar en el cuadrante I, traslado que no es instantáneo, sino que toma un tiempo que depende de la impedancia del generador y la impedancia equivalente del sistema al que está conectado, así como los voltajes del sistema y el voltaje atrás de la reactancia subtransiente  $V_T$ .” (Morales Mazariegos, 2005).

Figura 15. **Diagrama de potencias para máquinas síncronas**



Fuente: Morales. 2005, p. 134.

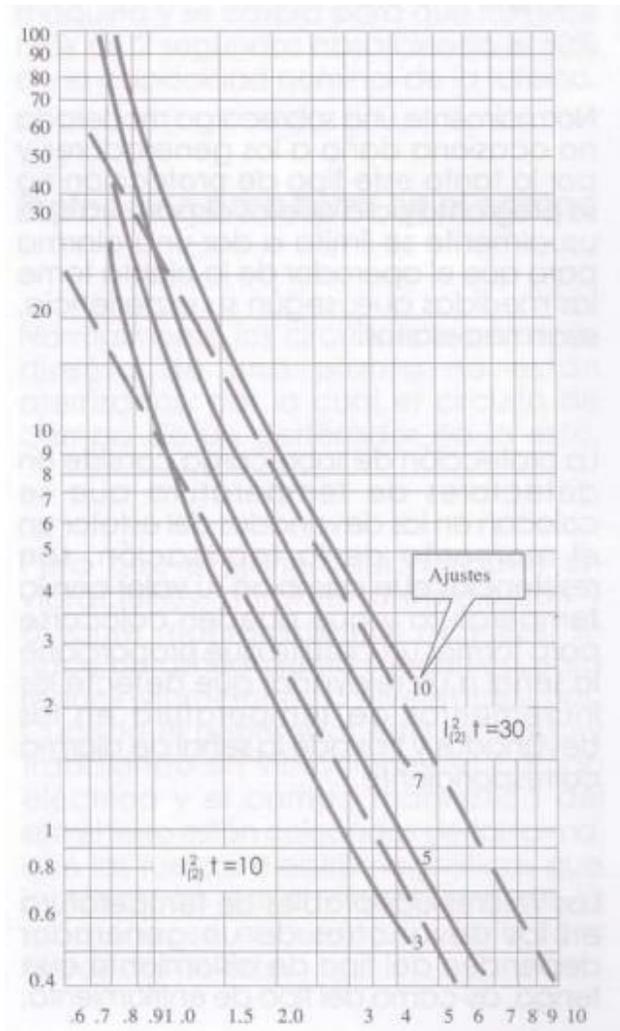
Dentro de las falla externas en los generadores de potencia tenemos:

- f. Motorización: esta se refiere a “cuando un generador síncrono no recibe potencia en su eje, se convierte en un motor siempre y cuando el voltaje de línea se mantenga en terminales y el voltaje de campo esté presente. En las turbinas de vapor esta situación puede generar calentamiento excesivo con daño potencial a la turbina y a las paletas.” (Morales Mazariegos, 2005). El mismo autor indica que, debido a que el valor de la

potencia que toma la máquina depende del tipo al que corresponda, debe cuidarse para que esta protección esté calibrada para que desde esta no pasen mas de 2 segundos absorbiéndose el 50 % de la capacidad nominal de la turbina. Para este tipo de falla se usa un un relé de proteccion de potencia inversa.

- g. Las cargas desbalanceadas: como indica Morales Mazariegos (2005): “las corrientes de secuencia negativa en un generador se originan por la operación desbalanceada o por la alimentación de fallas asimétricas, y tienden a atravesar el entrehierro y a aparecer en el rotor con una frecuencia relativa de 120Hz”.

Figura 16. **Curva típica y ajustes de un relevado de potencia para corrientes de secuencia negativa**



Fuente: Morales Mazariegos. 2005, p. 126.

Para este tipo de fallas se utilizan los relés de protección de secuencia negativa:

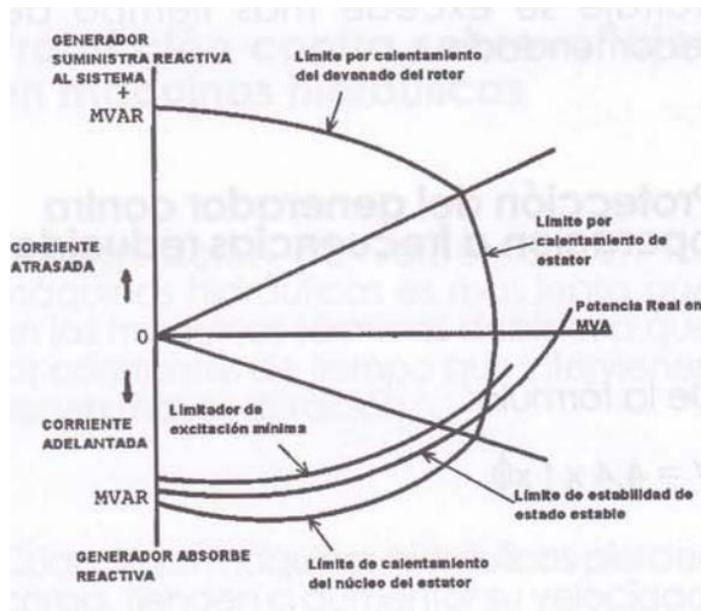
- h. Sobrecarga: en generadores de potencia, moderadamente una sobrecarga no ocasiona daño, esta se mide con detectores de temperatura, normalmente RTDs en los devanados de las fases estáticas del generador; los valores aceptables de temperatura

dependen del aislamiento, así como el tipo de sistema de enfriamiento con el que cuenta el generador, como indica Morales Mazariegos (2005).

- i. Sobrevelocidad: en una pérdida de carga el sistema del generador tiende a acelerarse, dependiendo de la inercia de la máquina, así como la magnitud de la carga perdida y la respuesta del gobernador de velocidad, según indica Morales Mazariegos (2005).

Así mismo, “las unidades térmicas, a diferencia de las hidráulicas, responden rápidamente al aumento inicial de la velocidad en caso de pérdida súbita de la carga, por ello se les debe colocar protección de velocidad”. (Caicedo, 2007, p. 196). Concluyendo: esta protección es secundaria al dispositivo de protección mecánica de sobrevelocidad del sistema, como el caso de los turbogeneradores al cual este sistema está asociado en la turbina de vapor.

Figura 17. **Curva de capacidad de una maquina síncrona de rotor cilíndrico**



Fuente: Morales. 2005, p.134.

#### **1.3.4.4. Pruebas de integridad para generadores de potencia**

Dentro de las consideraciones de la inspección visual en los generadores de potencia se encuentra lo siguiente:

“La condición en la que se puede realizar la inspección visual más extensiva y detallada es con el rotor extraído del generador. Los puntos principales a inspeccionar son los siguientes: verificar si hay zonas con polvo blanco en cuñas del estator y sobre amarres, separadores y barras en el cabezal, indicativo de actividad de descargas parciales. (Esparza & Ponce, 2001, p. 2)

Existen otras condiciones que pueden determinarse durante la inspección, relacionadas con los fines de mantenimiento y determinación del estado e integridad del aislamiento y los componentes del generador. En el tema correspondiente a las condiciones de los bobinados de un generador de potencia, se tomarán como referencia los procedimientos recomendados para pruebas de aislamiento en máquinas eléctricas, la teoría general de la resistencia del aislamiento y del índice de polarización, así como los factores que afectan estos resultados, que se indican en la normativa internacional IEEE Power Engineering Society (2000), de la siguiente manera:

“Índice de polarización: variación en el valor de la resistencia de aislamiento con el tiempo. El cociente de la resistencia de aislamiento en el tiempo ( $t_2$ ) dividido por la resistencia de aislamiento en el tiempo ( $t_1$ ). Si no se especifican los tiempos  $t_2$  y  $t_1$ , se supone que son 10 min y 1 min, respectivamente”. (IEEE, 200, p.3).

Tabla I. **Valores mínimos recomendados de índice de polarización para todas las clases de aislamiento de las maquinas según IEC 60085-01:1984**

<b>Thermal class rating</b>	<b>Minimum <i>P.I.</i></b>
Class A	1.5
Class B	2.0
Class F	2.0
Class H	2.0

Fuente: IEEE Power Engineering Society. 2000, p.16.

Haciendo referencia a la prueba de alto potencial que generalmente se realiza en generadores de potencia para definir problemas de aislamiento, Esparza y Ponce (2001) describen esta prueba con las siguientes recomendaciones:

“La prueba de alto potencial se puede realizar con corriente directa o con corriente alterna. Se recomienda esta última porque somete al aislamiento a un esfuerzo más real respecto a la operación del generador y es más sensible que la corriente directa a defectos serios del aislamiento. El inconveniente con la prueba con C.A. es que se requieren equipos de prueba de alta capacidad, especialmente en máquinas grandes. Por esta razón, generalmente esta prueba se realiza con C.D. Los valores de tensión de corriente alterna recomendados para esta prueba son los siguientes:

- En fabrica (  $2E_n + 1$  ) kV 1 minuto
- Puesta en servicio  $0.85 (2E_n + 1)$  kV 1 minuto

Si se quiere probar con corriente directa, se deben multiplicar los valores anteriores por 1,7. Las pruebas de alto potencial al aislamiento de los

devanados no son una práctica recomendada en CFE como mantenimiento, ya que se sobreesfuerza el aislamiento y se le resta vida. No se recomienda aplicar más de la tensión nominal de fase a tierra a un devanado”. (Esparza y Ponce, 2001, p.4)

Las pruebas citadas anteriormente corresponden a las más importantes para fines de la presente investigación.

### **1.3.5. El condensador y sistema de condensado**

En el artículo *El condensador* de Fuente García Garrido. (n.d.) se describe:

“Un condensador es un intercambiador térmico, en cual se pretende que el fluido que lo recorre cambie a fase líquida desde su fase gaseosa mediante el intercambio de calor (cesión de calor al exterior, que se pierde sin posibilidad de aprovechamiento) con otro medio.

“La condensación se puede producir bien utilizando aire mediante el uso de un ventilador (aerocondensadores) o con agua (esta última suele ser en circuito semicerrado con torre de refrigeración, o en circuito abierto proveniente de un río o del mar). El tipo de condensador más empleado en centrales termoeléctricas es el que utiliza agua como fluido refrigerante, que además utiliza un circuito semiabierto de refrigeración con una torre evaporativa como sumidero del calor latente de vaporización”.

Figura 18. **Condensador de una central térmica**



Fuente García Garrido. (n.d.), Aire acondicionado 1.

El propósito del condensador termodinámico es provocar el cambio de estado del vapor a la salida de la turbina para así obtener máxima eficiencia e, igualmente, obtener el vapor condensado en forma de agua pura de regreso al tren de generación de vapor. El mismo autor cita que las razones más importantes por las cuales el sistema del condensador es importante se deben al aprovechamiento del vapor que sale de la turbina, cerrando el ciclo de agua vapor del sistema, así como a reducir la presión de salida para mejorar, en el ciclo termodinámico que se trabaje, el rendimiento y la potencia de la turbina.

### **1.3.6. Sistema de bombeo de agua**

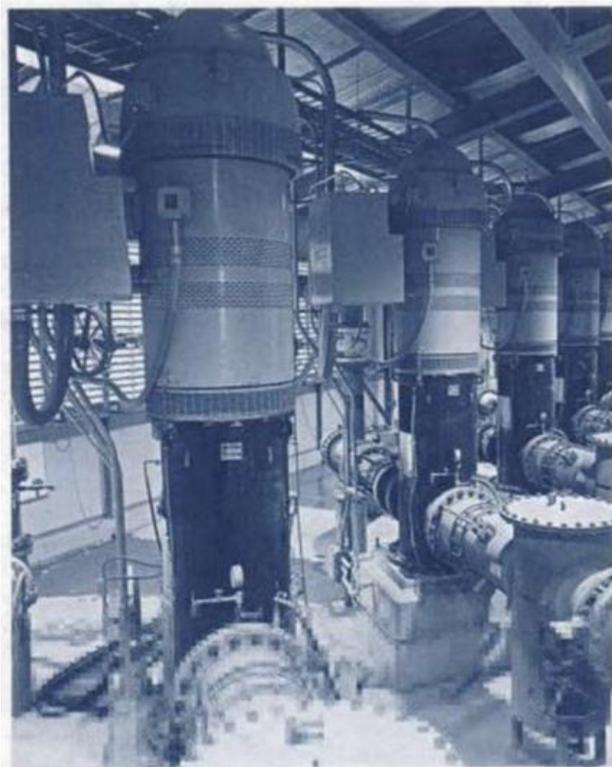
Este sistema corresponde a varios equipos e impulsa el condensador hacia la caldera, principalmente, de acuerdo al circuito de una estación central termoeléctrica.

“A fin de mejorar el ciclo básico, se conecta un condensador en la descara de la turbina, incrementando la caída de presión en esta última, con lo cual se logrará mayor transferencia de energía. El condensador, además, recupera una gran parte del agua, ya condensada, que se había suministrado a la caldera.

“Para mejorar la eficiencia del ciclo, se calienta el agua de alimentación de la caldera con el vapor que se extrae de un paso intermedio de la turbina. El ciclo de alimentación de agua a la caldera y el condensado requiere un mínimo de 3 bombas: la bomba de condensado que envía el agua desde el condensador hasta los calentadores, la bomba de alimentación de agua a la caldera, y la bomba de circulación que impulsa el agua fría a través de los tubos del condensador, con lo cual se logra condensar el vapor.” (Viejo Zubicaray & Alvarez Fernandez, 2004, p.151)

Se recomiendan bombas verticales tipo lata con bajo NPSH requerido para servicio de condensado en plantas termoeléctricas de generación.

**Figura 19. Bombas verticales tipo lata con bajo NPSH requerido para servicio de condensado en plantas termoeléctricas de generación**



Fuente: Viejo Zubicaray & Álvarez Fernández. 2004, p.162.

## 2. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO DE INFORME

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	I
LISTA DE SÍMBOLOS.....	II
GLOSARIO.....	IV
RESUMEN.....	V
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	VI
OBJETIVOS.....	VII
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO.....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	IX

### 1. MARCO TEÓRICO

#### 1.1. Gestión de mantenimiento

- 1.1.1. Sistemas integrados de gestión de mantenimiento e indicadores para mantenimiento
- 1.1.2. Modelos de gestión de mantenimiento aplicados a la industria
- 1.1.1. Mantenimiento de clase mundial para la industria energética

#### 1.2 Centrales termoeléctricas convencionales

- 1.2.1. Equipos de centrales termoeléctricas convencionales de bunker
- 1.2.2. Recomendaciones de mantenimiento para los equipos principales de una central termoeléctrica

#### 1.3 Turbogeneradores de potencia de centrales termoeléctricas

- 1.3.1 Características constructivas y funcionamiento de los turbogeneradores de potencia
- 1.3.2 Operación y funcionamiento de turbogeneradores de potencia
- 1.3.3 Protecciones y pruebas para turbogeneradores de potencia
- 1.3.4 Controles de mantenimiento para turbogeneradores de potencia

- 2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN
- 3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS
- 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS
- 5. PROPUESTA

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

## **3. METODOLOGÍA**

### **3.1. Diseño de la investigación**

El diseño de la investigación corresponde al tipo no experimental, derivado de que se realizará un análisis comparativo de un estudio de un caso de falla, en el cual se reunirán los criterios y los datos obtenidos del análisis de los informes técnicos, así como referencias de la normativa para este tipo de equipos, para deducir puntos críticos de control a tomar en un plan basado en una gestión de mantenimiento integral para un turbogenerador de potencia.

### **3.2. Tipo de estudio**

El tipo de estudio es descriptivo e investigativo, ya que utilizará como base informes generados a partir de la falla, registros históricos, documentos técnicos y evidencias fotográficas del caso para su análisis. También se presentará una propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento integral aplicado a turbogeneradores de potencia de centrales termoeléctricas de *bunker*.

### **3.3. Alcances**

- Realizar un estudio de caso para determinar los posibles factores que desencadenaron la falla del aislamiento de los devanados estatóricos durante la puesta en servicio del turbogenerador de 72MVA, que estuvo fuera de operación durante 30 años.

- Elaborar propuesta de la estructura organizacional del departamento de mantenimiento según criterios de una gestión integral.
- Diseñar una propuesta de un modelo de mantenimiento para turbogeneradores de potencia de acuerdo con una gestión de mantenimiento integral.

### **3.4. Variables e indicadores**

Las variables a analizar corresponden a tipo cuantitativo y cualitativo, siendo estas variables eléctricas y mecánicas, en análisis históricos y estándares definidos de operación, según las normativas técnicas. También se tomarán en cuenta los indicadores correspondientes a datos constructivos, capacidad, características y configuración propia del equipo en estudio.

### **3.5. Fases de la investigación**

Fase 1. Construcción del marco teórico

Fase 2. Recopilación de datos técnicos y teóricos para el estudio del caso, correspondiente a revisión de normativas técnicas de operación y diagnóstico de turbogeneradores eléctricos de potencia según normativas nacionales e internacionales. También se contempla compilar la información generada durante el proceso de puesta en servicio del turbogenerador en estudio y los informes posteriores a la falla para realizar el análisis causa-raíz.

Fase 3. Análisis comparativo de la información y determinación de posibles factores y causas del fallo en el turbogenerador de potencia.

Fase 4. Elaboración del plan de mantenimiento y estructura organizativa para determinar la propuesta óptima de un modelo de gestión aplicable a este equipo.

### **3.6. Plan de muestreo**

En el plan de muestreo en la elaboración del documento se realizará visita de campo, recolección de informes y documentos técnicos del caso, así como clasificación de datos de investigación, análisis matemático de variables de interés de estudio y revisión bibliográfica de normativas técnicas para equipos de centrales termoeléctricas.

### **3.7. Instrumentos para recolectar la información**

- Hojas de cálculo para análisis de variables de muestreo
- Recopilación fotográfica de falla
- Recopilación de documentos técnicos



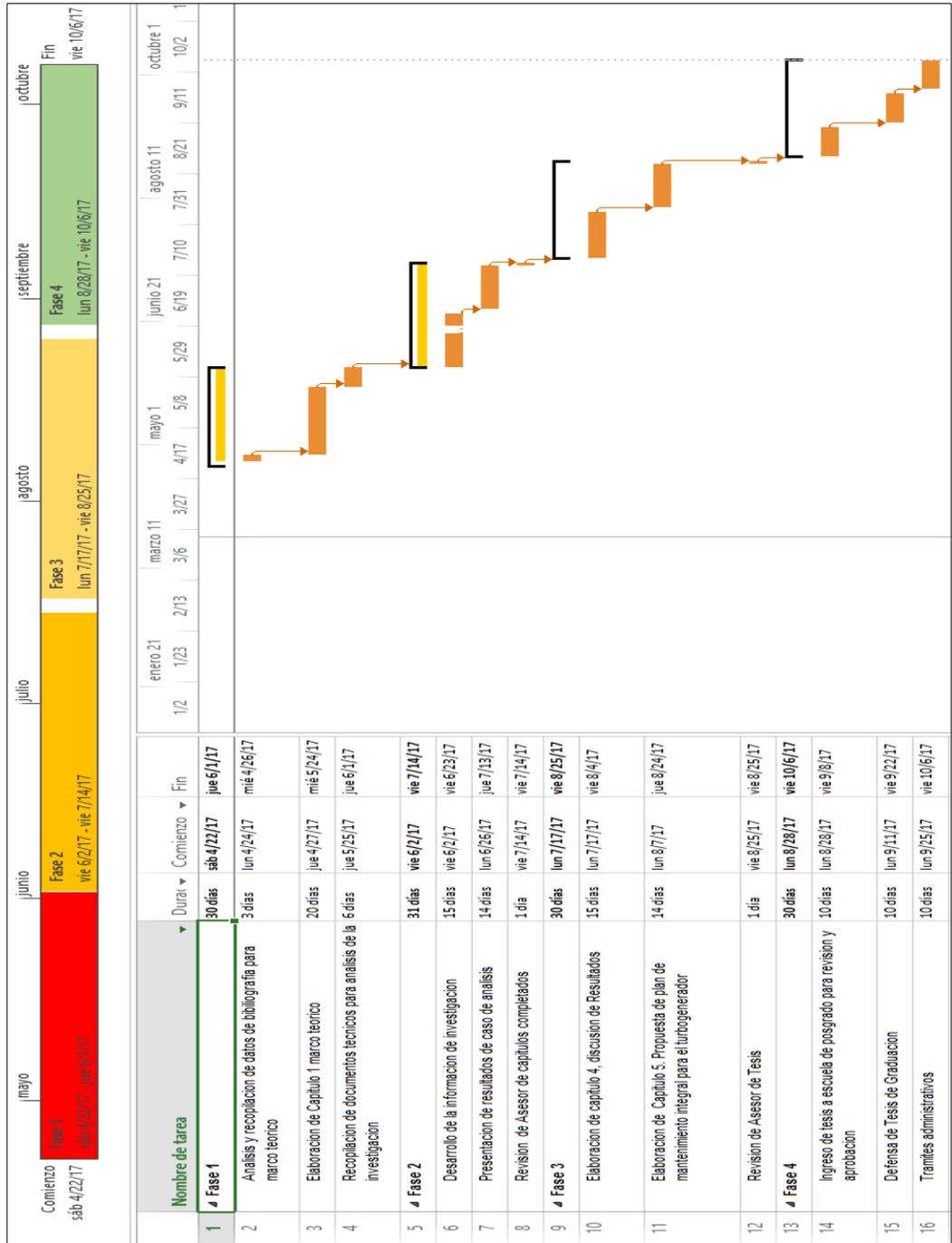
## **4. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN**

Para el análisis de datos se aplicará estadística descriptiva a través de la aplicación de modelos matemáticos de ingeniería eléctrica, para definir valores de coordinación de protecciones en generadores de potencia y parámetros de operación. Se elaborarán tablas y gráficos de operación para realizar el análisis comparativo entre los parámetros presentados en el turbogenerador bajo análisis y los establecidos según normativos técnicos nacionales e internacionales. Para todo ello se utilizará el programa Microsoft Excel de office 2016 como herramienta de análisis y presentación de datos



## 5. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES PROPUESTO

Tabla II. Diagrama de flujo de la investigación



Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Fases de la investigación**

<b>Nombre de tarea</b>	<b>Duración</b>	<b>Comienzo</b>	<b>Fin</b>
<b>Fase 1</b>	30 días	sáb 4/22/17	jue 6/1/17
<b>Análisis y recopilación de datos de bibliografía para marco teórico</b>	3 días	lun 4/24/17	mié 4/26/17
<b>Elaboración de Capítulo 1 marco teórico</b>	20 días	jue 4/27/17	mié 5/24/17
<b>Recopilación de documentos técnicos para análisis de la investigación</b>	6 días	jue 5/25/17	jue 6/1/17
<b>Fase 2</b>	31 días	vie 6/2/17	vie 7/14/17
<b>Desarrollo de la información de investigación</b>	15 días	vie 6/2/17	vie 6/23/17
<b>Presentación de resultados de caso de análisis</b>	14 días	lun 6/26/17	jue 7/13/17
<b>Revisión de Asesor de capítulos completados</b>	1 día	vie 7/14/17	vie 7/14/17
<b>Fase 3</b>	30 días	lun 7/17/17	vie 8/25/17
<b>Elaboración de capítulo 4, discusión de Resultados</b>	15 días	lun 7/17/17	vie 8/4/17
<b>Elaboración de Capítulo 5. Propuesta de plan de mantenimiento integral para el turbogenerador</b>	14 días	lun 8/7/17	jue 8/24/17
<b>Revisión de Asesor de Tesis</b>	1 día	vie 8/25/17	vie 8/25/17
<b>Fase 4</b>	30 días	lun 8/28/17	vie 10/6/17
<b>Ingreso de tesis a escuela de posgrado para revisión y aprobación</b>	10 días	lun 8/28/17	vie 9/8/17
<b>Defensa de Tesis de Graduación</b>	10 días	lun 9/11/17	vie 9/22/17
<b>Tramites administrativos</b>	10 días	lun 9/25/17	vie 10/6/17

Fuente: elaboración propia.

## **6. RECURSOS NECESARIOS Y FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO**

Dentro de los recursos necesarios para la elaboración del documento se cuenta con:

### **6.1. Recursos físicos**

Se contará con acceso a la información generada a partir de la falla del turbogenerador de 72 MVA de 13,8KV de 2 polos, trifásico, 3600 rpm, con excitación independiente bajo normativa ASTM-ANSI (1974). Se tendrán registros históricos y datos característicos de todos los equipos en análisis a fin de elaborar el estudio.

### **6.2. Recursos humanos**

Para realizar la presente investigación se contará con la asesoría de ingenieros del área de protecciones eléctricas con expertiz en generadores de potencia, así como con un asesor de investigación de tesis profesional y un investigador principal.

### **6.3. Recursos Financieros**

Los recursos financieros para la elaboración del estudio son los siguientes:

Tabla IV. **Análisis de costos y factibilidad de la investigación**

<b>Análisis de costos y factibilidad</b>		
Gastos de asesoría técnica	Q	2,500.00
Honorarios de investigador	Q	50,000.00
Gastos de transporte (combustible)	Q	1,500.00
Viáticos y hospedaje	Q	4,500.00
Útiles de oficina e impresiones	Q	1,500.00
Gastos varios	Q	1,500.00
Membresía para el acceso a documentación técnica de IEEE	Q	3,200.00
<b>Total</b>	Q	64,700.00

Fuente: elaboración propia.

## BIBLIOGRAFÍA

1. AAMODT, M. (2010). Psicología industrial / organizacional. México, D.F. Cengage Learning, S. A.
2. ARELLANO, M.; LÓPEZ, M.; SOLER, K. (2015). Sistemas de información para la gestión de mantenimiento en la gran industria del estado Zulia. Universidad del Zulia (LUZ), Venezuela.
3. Asociación Española de la Industria Eléctrica -UNESA- n.d. Funcionamiento de centrales eléctricas. [en línea] <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas>. Consultado el 22 de marzo 2017.
4. CARRILLO CAICEDO, G. (2007). Protecciones eléctricas. Universidad Industrial de Santander, Colombia.
5. Consejería de Economía y Hacienda. (2013) Guía básica de calderas industriales eficientes. Madrid, España. [en línea] <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-basica-calderas-industriales-eficientes-fenercom-2013.pdf>. Consultado el 23 de marzo 2017.
6. ESPARZA SAUCEDO, M.; PONCE DE LEÓN, E. (2001). Diagnóstico integral del devanado del estator de generadores eléctricos. Comité Nacional de CIGRE. México. [en línea]

<http://www.cigre.org.mx/uploads/media/11-01.PDF>. Consultado el 22 de marzo 2017.

7. FERNÁNDEZ RAMÍREZ, I.; ROBLES DÍAS, A. (2012) Centrales de generación de energía eléctrica. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética Universidad de Cantabria, España.[en línea] <http://ocw.unican.es/enseanzas-tecnicas/centrales-de-generacion-de-energia-electrica/materiales/bloque-energia-IV.pdf>. Consultado el 23 de marzo 2017.
8. FRAILE MORA, J. (2003). Máquinas eléctricas. España. Mac Graw Hill Interamericana de España, S.A.U.
9. GARCÍA GARRIDO, S. (n.d.). Manual de ciclo agua-vapor en centrales termoeléctricas, RENOVETEC. [en línea] <http://www.cicloaguavapor.com/103-contenido/condensador>. Consultado el 23 de marzo de 2017.
10. GARCÍA GARRIDO, S. (2003). Organización y gestión integral de mantenimiento. Ediciones Díaz de Santos, S.A. Madrid España.
11. GARCÍA GARRIDO, S. (n.d.). Organización y gestión del mantenimiento de instalaciones. Portal de la Junta de Andalucía. España. [en línea] [http://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/21700502moodle/file.php/78/2\\_Curso/0040.\\_Montaje\\_y\\_mantenimiento\\_de\\_equipos\\_de\\_refrigeracion\\_comercial/Capitulo\\_IV/Organizacion\\_y\\_gestion\\_del\\_mantenimiento\\_de\\_instalaciones\\_modif.pdf](http://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/21700502moodle/file.php/78/2_Curso/0040._Montaje_y_mantenimiento_de_equipos_de_refrigeracion_comercial/Capitulo_IV/Organizacion_y_gestion_del_mantenimiento_de_instalaciones_modif.pdf). Consultado el 27 de marzo de 2017.

12. GONZÁLES CHÁVEZ, S. (2015). Centrales termoeléctricas y plantas de generación. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Mecánica, Departamento Académico de Ingeniería Aplicada. Lima, Perú.
13. GUPTA, B.; STONE, G.; STEIN, J. (2009). Stator winding HIPOT (high potential) testing. IEEE -Electrical Insulation Conference.
14. IEEE Power Engineering Society. (2000). Std 43-2000. Recommended practice of testing insulation resistance of rotating machinery. IEEE Press, New York.
15. LÓPEZ DEL ÁNGEL, J.; RUIZ REYES, C. (2002). Inspección de integridad para turbinas de vapor en centrales termoeléctricas. Universidad Veracruzana, México.
16. MANZO, E. (2005). Protecciones de generadores síncronos. Guatemala, Guatemala.
17. MORALES MAZARIEGOS, J. (2005). Elementos básicos de protección de sistemas de potencia. Guatemala. Sergráfica, S.A.
18. RENEDO, C., (n.d.). Aire acondicionado I.I. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria, España. [en línea]  
<http://personales.unican.es/renedoc/Traspereancias%20WEB/Trasp%20AA/008%20Calderas%20OK.pdf>. Consultado el 23 de marzo 2017.

19. RODRÍGUEZ ARAUJO, J. (2008). Gestión del mantenimiento. [en línea] <https://es.scribd.com/doc/7497765/Gestion-del-mantenimiento>. Consultado 22 de marzo 2017.
20. Servicio Nacional de Adiestramiento en el Trabajo Industrial -SENATI-. (2007). Módulo 2: mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo. Primera Edición, Lima Perú.
21. VIEJO ZUBICARAY, M.; ÁLVAREZ FERNÁNDEZ, J. (2004). Bombas: teoría, diseño y aplicaciones. 3ra. Edición. Editorial Limusa, S.A. Grupo Noriega Editores, México, D.F. [en línea] [https://books.google.com.gt/books?id=k5aduoRGsakC&dq=condensador+y+sistema+de+condensado+para+calderas+de+vapor&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.com.gt/books?id=k5aduoRGsakC&dq=condensador+y+sistema+de+condensado+para+calderas+de+vapor&source=gbs_navlinks_s). Consultado el 22 de marzo del 2017.
22. VIVEROS; et al. (2013). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 21 N° 1, 2013, págs. 125-130.

