



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO  
EN CONFIABILIDAD APLICADO A INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE LA UNIDAD DE  
GENERACIÓN DE CICLO BINARIO EN UNA PLANTA GEOTÉRMICA UBICADA EN EL  
DEPARTAMENTO DE ESCUINTLA, GUATEMALA**

**Marvin Iván Bardales Espinoza**

Asesorado por MSc. Ing. Daniel Angel Figueroa García

Guatemala, febrero de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO  
EN CONFIABILIDAD APLICADO A INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE LA UNIDAD DE  
GENERACIÓN DE CICLO BINARIO EN UNA PLANTA GEOTÉRMICA UBICADA EN EL  
DEPARTAMENTO DE ESCUINTLA, GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**MARVIN IVÁN BARDALES ESPINOZA**

ASESORADO POR MSC. ING. DANIEL ANGEL FIGUEROA GARCÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, FEBRERO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**


DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Armando Gálvez Castillo
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
EXAMINADOR	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
SECRETARIO	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

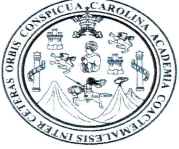
En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD APLICADO A INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE LA UNIDAD DE GENERACIÓN DE CICLO BINARIO EN UNA PLANTA GEOTÉRMICA UBICADA EN EL DEPARTAMENTO DE ESCUINTLA, GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 29 de octubre de 2022.

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized initials and a surname, positioned above the printed name.

**Marvin Iván Bardales Espinoza**



**EEPFI-PP-1576-2022**

Guatemala, 7 de noviembre de 2022

**Director**  
**Armando Alonso Rivera Carrillo**  
**Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica**  
**Presente.**

**Estimado Ing. Rivera**

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingenieria.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD APLICADO A INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE LA UNIDAD DE GENERACIÓN DE CICLO BINARIO EN UNA PLANTA GEOTÉRMICA UBICADA EN EL DEPARTAMENTO DE ESCUINTLA, GUATEMALA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Gestión del Mantenimiento - Aseguramiento del cumplimiento del programa de mantenimiento**, presentado por la estudiante **Marvin Iván Bardales Espinoza** con cui **2121429680501**, quien optó por 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 en ARTES en Ingeniería De Mantenimiento.

Y 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 Ingenieria en el Punto Décimo, 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.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

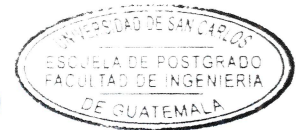


Mtro. Daniel Angel Figueroa García  
Asesor(a)



*Rocío Medina Galindo*

Mtra. Rocio Carolina Medina Galindo  
Coordinador(a) de Maestría



*Edgar Dario Alvarez Coti*

Mtro. Edgar Dario Álvarez Cotí  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería





EEP-EIME-1349-2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD APLICADO A INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE LA UNIDAD DE GENERACIÓN DE CICLO BINARIO EN UNA PLANTA GEOTÉRMICA UBICADA EN EL DEPARTAMENTO DE ESCUINTLA, GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Marvin Iván Bardales Espinoza**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

The image shows a handwritten signature in black ink over a circular official stamp. The stamp contains the text: "UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA", "DIRECCIÓN ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA", and "FACULTAD DE INGENIERIA".

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo  
Director  
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica

Guatemala, noviembre de 2022



Decanato  
Facultad de Ingeniería  
24189101- 24189102  
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.172.2023

La Decana 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: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD APLICADO A INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE LA UNIDAD DE GENERACIÓN DE CICLO BINARIO EN UNA PLANTA GEOTÉRMICA UBICADA EN EL DEPARTAMENTO DE ESCUINTLA, GUATEMALA**, presentado por: **Marvin Iván Bardales Espinoza**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana



Guatemala, febrero de 2023

AACE/gaoc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Quien me ha acompañado en todo momento, llenando de sabiduría, amor y perseverancia mi vida.
- Mis padres** Arnoldo Bardales y Juana Espinoza, por darme la vida, amor y su apoyo incondicional, este triunfo es suyo.
- Mi esposa** Karen Balcárcel por brindarme su apoyo, comprensión, tolerancia y alegrarme en los momentos difíciles. Mi eterno amor y gratitud para ti.
- Mis hijos**  
A mi futura hija Verónica Isabel, te amamos con todo el corazón y te estamos esperando con mucha ilusión y alegría, primero Dios pronto estarás con nosotros.  
A mi hijo Gonzalo Bardales sin importar la distancia, yo siempre estaré a tu lado y quiero ser tu ejemplo a seguir.
- Mis hermanos** Arelys, Alexis y Walter Bardales, por todo lo que me han enseñado y apoyado.
- Mis abuelos** Amanda Ortiz y Roque Bardales (q.e.p.d.), por sus sabias enseñanzas y consejos durante toda



mi vida, los tengo en mi corazón.

**A toda mi familia**

En general gracias a todos por su cariño en todo momento. En especial a mis tías Ana María y Verónica Bardales por sus sabios consejos, mis primos Luis y María Madrid por compartir muchas alegrías en mi vida, son como mis hermanos.

**A mis amigos**

Cristian Ruiz, Melvin Castro, Luis Pérez, Luis Ruano, Jorge Godínez, Jorge Godoy, Alex Estrada, Mario Quino, Ronald Castillo, José Morales, Rodolfo Castillo, Esteban Loranca, Pablo Aceituno, David Letona y Dario Doherr por su valiosa y sincera amistad, gracias por todos los momentos compartidos.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por ser el alma mater que me permitió nutrirme de conocimientos.

**Facultad de Ingeniería**

Por proporcionarme los conocimientos que me han permitido realizar este trabajo de graduación.

**Mi asesor**

Msc. Ing. Daniel Figueroa por haberme guiado y darme el apoyo necesario en base a su experiencia y conocimiento para realizar este diseño de investigación.

**Familia y amigos en  
general**

Por acompañarme en mi carrera y los buenos momentos que hemos compartido. En especial un cariñoso reconocimiento a los que me han demostrado su apoyo y brindado sus ánimos y consejos.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SIMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XV
1. ANTECEDENTES .....	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
2.1. Contexto general .....	5
2.2. Descripción del problema .....	6
2.3. Delimitación del Problema .....	8
2.4. Formulación del problema .....	8
2.4.1. Pregunta principal .....	8
2.4.2. Preguntas secundarias .....	8
3. JUSTIFICACIÓN.....	9
4. OBJETIVOS.....	11
4.1. General.....	11
4.2. Específicos .....	11
5. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN .....	13
6. MARCO TEÓRICO.....	15

6.1.	Mantenimiento industrial .....	15
6.1.1.	Historia del mantenimiento .....	15
6.1.1.1.	Primera generación .....	15
6.1.1.2.	Segunda generación.....	15
6.1.1.3.	Tercera generación.....	16
6.1.1.4.	Cuarta generación .....	16
6.1.2.	Tipos de mantenimiento .....	17
6.1.2.1.	Mantenimiento correctivo.....	17
6.1.2.2.	Mantenimiento preventivo.....	18
6.1.2.3.	Mantenimiento predictivo .....	18
6.1.2.4.	Mantenimiento centrado en confiabilidad.....	18
6.1.2.5.	Fallas funcionales .....	19
6.1.2.5.1.	Modo de falla .....	19
6.1.2.5.2.	Efectos de las fallas .....	20
6.1.2.5.3.	Consecuencia de las fallas	21
6.1.2.5.4.	Análisis modal de fallos y efectos (AMFE) .....	21
6.1.2.5.5.	Análisis de criticidad .....	22
6.1.3.	Gestión de mantenimiento.....	22
6.1.3.1.	Plan de mantenimiento .....	22
6.1.3.2.	Objetivos.....	22
6.1.3.3.	Indicadores de mantenimiento .....	23
6.1.3.3.1.	Disponibilidad .....	23
6.1.3.3.2.	Tiempo medio entre fallas.	24
6.1.3.3.3.	Tiempo medio de reparación.....	24
6.1.3.3.4.	Confiabilidad .....	25
6.2.	Energía Eléctrica.....	25

6.2.1.	Energía renovable.....	25
6.2.1.1.	Energía geotérmica.....	26
6.2.1.1.1.	Reservorios de muy baja temperatura .....	26
6.2.1.1.2.	Reservorios de baja temperatura .....	26
6.2.1.1.3.	Reservorios de media temperatura .....	27
6.2.1.1.4.	Reservorios de alta temperatura .....	27
6.2.1.2.	Tipos de plantas geotérmicas.....	28
6.2.1.2.1.	Plantas tipo “ <i>Single flash</i> ” ..	28
6.2.1.2.2.	Plantas tipo “ <i>Double flash</i> ” ..	28
6.2.1.2.3.	Planta tipo binario.....	28
6.2.1.2.4.	Ciclo de Rankine .....	29
6.3.	Reseña histórica de planta geotérmica .....	30
7.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	31
8.	METODOLOGÍA .....	35
8.1.	Enfoque .....	35
8.2.	Diseño de la investigación .....	35
8.3.	Tipo de estudio .....	35
8.4.	Alcance del estudio.....	36
8.5.	Variables e indicadores .....	36
8.6.	Fases del estudio.....	39
8.7.	Resultados esperados .....	40
8.8.	Población y muestra .....	40
8.8.1.	Población “N” .....	40

8.8.2.	Muestra “n” .....	40
9.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN .....	43
10.	CRONOGRAMA .....	45
11.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	47
12.	REFERENCIAS .....	49
13.	APÉNDICE .....	55

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Tendencia de salidas de servicio no programadas y pérdidas económica.....	7
2.	Esquema de solución .....	14
3.	Evolución de las técnicas de mantenimiento .....	17
4.	Fórmula de disponibilidad.....	24
5.	Fórmula de tiempo medio entre fallas.....	24
6.	Fórmula de tiempo medio de reparación .....	25
7.	Ciclo de Rankine .....	29
8.	Formula muestral para una población finita .....	40
9.	Cronograma de actividades.....	45

### TABLAS

I.	Clasificación de los reservorios geotérmicos .....	27
II.	Operacionalización de variables .....	37
III.	Presupuesto .....	48





## LISTA DE SIMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
°C	Grados Celsius
°	Grados
Hz	Hertz
h	Hora
KW	Kilovatio
Km	Kilómetro
KV	Kilovoltio
MW	Megavatio
MWh	Megavatio hora
m	Metro
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
P	Potencia activa
Q	Quetzales (moneda)



## GLOSARIO

<b>AMFE</b>	Análisis Modal de Fallas y Efectos
<b>AMM</b>	Administrador del Mercado Mayorista
<b>ANÁLISIS V.O.S.O.</b>	Consiste en detectar o localizar de forma sensorial una condición anormal inminente en máquinas o equipos se deriva de sus iniciales Ver, Oír, Sentir y Oler.
<b>CICLO DE RANKINE</b>	Ciclo termodinámico que tiene como objetivo la conversión de calor en trabajo
<b>CONFIABILIDAD</b>	Probabilidad de que un equipo cumpla el trabajo por el que fue adquirido.
<b>CRITICIDAD</b>	Nivel de importancia que tiene un equipo dentro del proceso productivo.
<b>DISPONIBILIDAD</b>	Porcentaje de tiempo que un equipo se encuentra disponible para ejecutar un trabajo.
<b>FACTIBILIDAD</b>	Disponibilidad de los recursos necesarios para llevar a cabo los objetivos o metas señaladas en un proyecto.
<b>FALLA</b>	Evento inesperado que implican el mal funcionamiento o el cese en las funciones de los equipos.
<b>GENERADOR DE POTENCIA</b>	Máquina eléctrica rotativa que transforma energía mecánica en energía eléctrica.
<b>GEOTERMIA</b>	Campo de la ciencia dedicado al estudio del calor existente debajo de la superficie de la Tierra.

<b>INDICADOR</b>	Unidades de medición que permite evaluar el rendimiento de los procesos.
<b>MANTENIBILIDAD</b>	Es la capacidad de un elemento, bajo determinadas condiciones de uso, para ser conservado o restaurado.
<b>MATRIZ ENERGÉTICA</b>	Es una representación cuantitativa de la totalidad de energía que utiliza un país, e indica las fuentes de las que procede cada tipo de energía.
<b>MCC o RCM</b>	Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.
<b>MERCADO SPOT</b>	También llamado mercado de oportunidad; es donde se realizan transacciones de oportunidad de la energía eléctrica, a un precio establecido en forma horaria.
<b>MODO DE FALLA</b>	Causa de falla o posible manera en la que un equipo puede fallar.
<b>MTBF</b>	Tiempo medio entre fallas por sus siglas en ingles.
<b>MTTR</b>	Tiempo medio para reparación por sus siglas en ingles.
<b>MVA</b>	Mega Voltio Ampere.
<b>PAROS NO PROGRAMADOS</b>	Eventos imprevistos que obligan detener un equipo para resolver un problema.
<b>RESERVORIO</b>	Zona de roca fracturada que se calienta con la fuente de calor y permite que el fluido geotermal circule a través de él.

<b>SNI</b>	Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.
<b>STOCK</b>	Conjunto de productos que se encuentran almacenados.
<b>TERMODINÁMICA</b>	Rama de la física encargada del estudio de la interacción entre el calor y otras manifestaciones de la energía.
<b>TPM</b>	Mantenimiento Productivo Total.



## RESUMEN

En Guatemala el mantenimiento correctivo predomina ante el resto de las estrategias en muchas industrias, esto a causa de los costos bajos a corto plazo; pero es importante relacionar al mantenimiento como una inversión a corto, mediano y largo plazo dado que es uno de los ejes fundamentales de la empresa, los propósitos principales son de extender la vida útil y minimizar la probabilidad de falla de los equipos.

En el caso de la planta geotérmica objeto de estudio, el plan de mantenimiento a la fecha no cumple con su propósito y no tiene congruencia con el tiempo de operación de las unidades de ciclo binario, provocando salidas de servicios no programadas debidos a fallos en equipos de instrumentación y control, las cuales tienen como consecuencia pérdidas económicas, los costos que se asumen son altos al tomar en cuenta las sanciones y compra de la energía eléctrica faltante a otras unidades de generación en el mercado SPOT para cumplir con el contrato asociado a la planta.

Por lo tanto, el objetivo principal de este estudio es desarrollar un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad aplicado a instrumentación y control para reducir la problemática principal de la planta. El mantenimiento centrado en confiabilidad es una metodología de análisis sistemático que puede conducir a mejoras significativas en la confiabilidad de los equipos, el rendimiento y la disponibilidad de las unidades de la planta geotérmica; minimizando el mantenimiento correctivo y optimizando los programas de mantenimiento predictivo y preventivo. Esperando resultados que beneficien al proceso y a la planta.





## INTRODUCCIÓN

El presente diseño de investigación se desarrolla en base a una sistematización de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad aplicado a instrumentación y control, con el propósito de mejorar las actividades de mantenimiento, extendiendo la vida útil y reduciendo la probabilidad de fallo de los equipos de la unidad de generación de ciclo binario de la planta geotérmica ubicada en Escuintla, Guatemala; orientando las tareas y determinando los equipos y repuestos necesarios a tener en bodega según la criticidad de los mismos aplicando un análisis modal de fallos y efectos (AMFE) y una clasificación de inventarios ABC.

El problema que tiene la planta geotérmica objeto de estudio es el aumento de las pérdidas económicas en los últimos años por salidas de servicio no programadas de la unidad de generación de ciclo binario; esto debido a un plan de mantenimiento que no es óptimo, el cual no toma en cuenta la criticidad de los equipos, los tiempos de ejecución y los equipos o repuestos necesarios a tener en bodega para solventar una falla o salida de servicio no programada.

La importancia del trabajo de investigación se centra en el diseño de un plan de mantenimiento eficiente considerando los tiempos de ejecución, la priorización de tareas preventivas y predictivas, según la criticidad de los equipos de la unidad de generación derivado de un análisis modal de fallos y efectos, reduciendo la probabilidad fallos en equipos de instrumentación y control.

El enfoque del estudio propuesto es cualitativo, ya que se realiza un análisis cualitativo de la criticidad de los equipos de instrumentación y control en la unidad de generación; Además, el gerente de planta evaluará los beneficios del plan de

mantenimiento determinando si es factible o viable por medio de los indicadores de mantenimiento seleccionados a su criterio, por lo tanto, esta parte del estudio es cualitativo.

El trabajo de investigación es factible porque se cuenta con los recursos necesarios para desarrollar las fases propuestas del trabajo de investigación. Además, la gerencia de la planta autoriza el recurso humano, materiales físicos, tecnológicos y equipos, así como el acceso a la información, permisos e infraestructura necesaria para su desarrollo.

A continuación, se detalla un resumen de los capítulos que conformarán el informe final:

En el primer y segundo capítulo, se desarrolla el marco referencial y teórico, en donde se realizará una revisión de la teoría relacionada con las unidades de ciclo binario, mantenimiento centrado en confiabilidad, análisis modal de fallos y efectos, análisis de criticidad y títulos relacionados con esta.

En el tercer capítulo, se genera el desarrollo de la investigación, se dará a conocer la situación actual de los equipos de instrumentación y control mediante un análisis V.O.S.O.; además, se establecerá la criticidad de los equipos involucrados en la unidad de generación mediante un análisis modal de fallos y efectos, con la finalidad de determinar las tareas o procedimientos del plan de mantenimiento adecuados.

El cuarto capítulo, será la presentación de resultados, los cuales servirán como base para el análisis y generar la propuesta del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad de la unidad de generación de ciclo binario.

Para finalizar, el quinto capítulo, se presenta una discusión de resultados con respecto a la propuesta definitiva del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad.



## 1. ANTECEDENTES

Para el diseño de investigación de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad aplicado a instrumentación y control es necesario el análisis de estudios relacionados con esta metodología de mantenimiento, esto con el fin de recopilar información, técnicas y herramientas necesarias para obtener mayor conocimiento del estudio a investigar.

En el estudio titulado “Aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) a bombas de carga en una refinería” Cruzado (2020) explica:

Para la aplicación efectiva del mantenimiento centrado en confiabilidad, no simplemente se planifica un mantenimiento viable, sino aceptar que es una nueva herramienta de trabajo en la que deben de colaborar todas las personas involucradas en el proceso. (pág. 61)

Además, se ha llevado a cabo un análisis sobre las fallas con un alto grado de detalle para elegir las tareas de mantenimiento prioritarias de los equipos con mayor criticidad utilizando el diagrama lógico de decisión del mantenimiento centrado en confiabilidad. (Cruzado, 2020, pág. 61)

El antecedente internacional anterior contribuye a la presente investigación lo necesario para realizar un análisis de la criticidad de los equipos y en la mejora de la confiabilidad cuando se aplica el mantenimiento centrado en confiabilidad.

En el estudio titulado “Análisis del mantenimiento centrado en la confiabilidad – RCM – en la subestación San José, para la estabilidad del sistema

interconectado nacional SEIN, en base a la confiabilidad de sus equipos” Achahuanco (2020) expone:

“La implementación de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad para mejorar la confiabilidad del equipo más crítico de la Subestación SAN JOSÉ, concluyendo que, al realizar un mantenimiento semestral y no anual, mejora en un 95 % su confiabilidad”. (pág. 73)

Según el antecedente internacional anterior, contribuye a la investigación la posibilidad de obtener una mejora significativa en la disponibilidad de la unidad de generación, basándose en el mantenimiento centrado en confiabilidad.

En el estudio titulado “Desarrollo de un sistema de gestión de Mantenimiento para reducir la presencia sistemática de fallas y paras imprevistas en equipos y maquinarias en la empresa de productos AVON Ecuador” Suárez (2018) manifiesta:

Que la división de mantenimiento era responsable de ocuparse de los importantes activos asignados para la preparación, ejecución y control de las tareas de mantenimiento; el desarrollo de estas tareas define la efectividad de dicho departamento. Estableciendo una mejora significativa que disminuyó un 92 % el tiempo de salidas de servicio no programadas. (pág. 13).

Esto aporta a la investigación los beneficios de la aplicación de la metodología del mantenimiento preventivo como complemento del mantenimiento centrado en confiabilidad.

En la tesis titulada “Aplicación de RCM como estrategia de implementación

del mantenimiento predictivo para la metodología TPM” Maya (2018) presenta:

La aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad utilizando como procedimiento la base de la metodología TPM (*Total Productive Maintenance*), dando otra dirección a los planes de mantenimiento preventivo del área, permitiendo buscar la planificación y organización de nuevos programas de mantenimiento, razonando que la técnica del sistema TPM complementada con la estrategia RCM permite realizar un mantenimiento totalmente efectivo. (Maya, 2018, pág. 75)

Esto contribuye a la investigación la relación del mantenimiento centrado en confiabilidad con otros tipos de mantenimiento y su efectividad al ser aplicado.

En el estudio titulado “Adaptación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en un sistema crítico de aire acondicionado de la Clínica Universitaria Bolivariana (CUB)” Gandur (2017) presenta: La elaboración de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad que pueda ser aplicado en la mejora del desempeño de los sistemas de aire acondicionado de la Clínica Universitaria Bolivariana. Con la finalidad que al aplicar el AMFE fue posible reconocer las tareas de mantenimiento que disminuyan o eliminan la probabilidad de que ocurra una falla, lo que influye en la confiabilidad de cada uno de los equipos y la disponibilidad del proceso. (pág. 95)

Lo anterior aporta a la investigación la importancia y algunos beneficios al aplicar un análisis modal de fallos y efectos (AMFE) a la unidad de generación.





## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **2.1. Contexto general**

La planta geotérmica ubicada en Escuintla la cual pertenece a una empresa internacional que cuenta con dos plantas generadoras de energía eléctrica de este tipo en Guatemala; el plan de mantenimiento de la planta objeto de estudio no posee un plan detallado y no tiene concordancia con el tiempo de operación de las unidades de ciclo binario, provocando salidas de servicios no programadas debidos a fallos en equipos de instrumentación y control, las cuales tienen como consecuencia sanciones económicas y operativas de parte del ente regulador.

¿Cuál es el propósito de un plan de mantenimiento?, “el propósito de las actividades de mantenimiento es extender la vida útil y reducir la probabilidad de falla de los equipos que conforman un sistema o conjunto de equipos. Cada tipo de equipo puede tener una estrategia diferente de acuerdo a lo definido por la empresa. En la actualidad la mayoría de los mantenimientos se realizan con intervalos de tiempo fijos y en algunos casos consideran su condición, esto causa indisponibilidades no optimizadas de los mismos” (Endrenyi y Aboresheid, 2001; citado por Martínez, 2014, págs. 18-19).

Uno de los factores determinantes para un mantenimiento adecuado que en ocasiones la compañía no tiene en consideración es su tiempo, esto debido a las pérdidas de producción que se obtiene durante la realización de este, por lo tanto, deciden prolongar el tiempo de ejecución entre cada mantenimiento y acortar su duración sin tomar en cuenta los riesgos que pueden sufrir los equipos. “Esto se debe a que el mantenimiento recibe con frecuencia muy poca atención y se le tiene como un recurso para cubrir emergencias e imprevistos, llegándose a

considerar una carga para producción". (García, 2006, pág. 1)

## **2.2. Descripción del problema**

Este es el caso de la planta geotérmica ubicada en Escuintla, Guatemala con una capacidad instalada de 25.2 MW que inició su operación comercial el año 2007 y consta de una unidad de 1.2 MW de vapor y dos unidades de 12 MW cada una de ciclo binario; Es decir, se basan en el ciclo termodinámico del ciclo de Rankine orgánico convirtiendo el calor en trabajo mecánico que a su vez es convertido en energía eléctrica, utilizando un fluido motriz para rotar la turbina acoplada al eje del generador eléctrico.

En resumen el problema surge ya que con anterioridad la duración de los mantenimientos en dicha unidad eran de dos semanas y de forma anual, pero debido a la reestructuración empresarial y a cambios gerenciales que ha tenido la planta, actualmente los mantenimientos tienen una duración de cuatro días y pretenden prolongar el tiempo de ejecución a cada dos años, por lo tanto, se está dando un aumento de salidas de servicio no programadas de las unidades de generación como lo demuestran los datos siguientes:

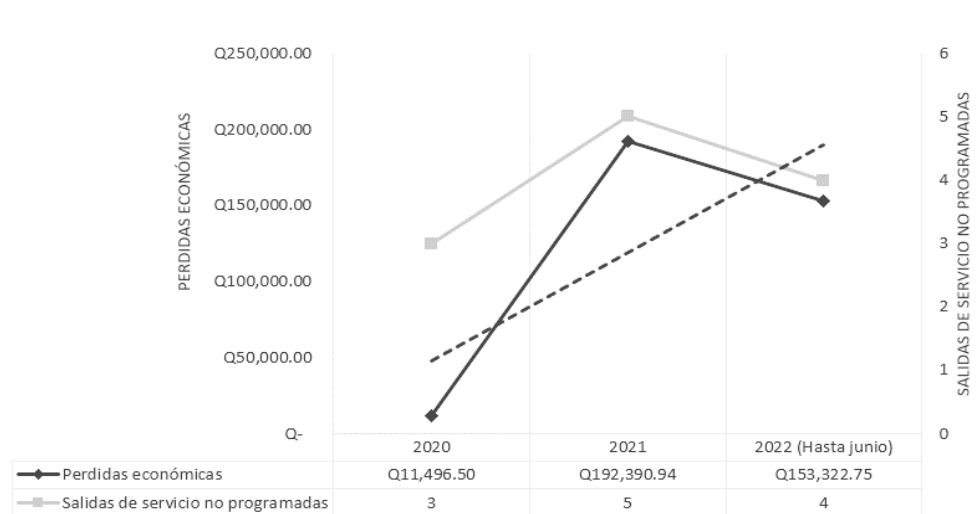
En el año 2020 se tuvieron tres salidas de servicio no programadas debido a fallas en equipos de instrumentación y control con una duración total de 8.6 horas, una potencia activa total pérdida de 18.67 MW y una energía total pérdida de 35.78 MWh; estimando una pérdida de Q11,496.50 por la falta de generación.

En el año 2021 se tuvieron cinco salidas de servicio no programadas debido a fallas en equipos de instrumentación y control con una duración total de 90.78 horas, una potencia activa total pérdida de 29.28 MW y una energía total pérdida de 389.23 MWh; estimando una pérdida de Q192,390.94 por la falta de generación.

En el transcurso del presente año 2022 hasta el mes de junio se han tenido cuatro salidas de servicio no programadas debido a fallas en equipos de instrumentación y control con una duración total de 20.52 horas, una potencia activa total pérdida de 33.32 MW y una energía total pérdida de 188.86 MWh; estimando una pérdida de Q 153,322.75 por la falta de generación. Fuente: Planta geotérmica.

Las pérdidas totales por salidas de servicio no programadas debido a fallas en equipos de instrumentación y control en la planta tiene una tendencia alcista (ver figura 1) y los costos que se asumen son altos al tomar en cuenta las sanciones y compra de la energía eléctrica faltante a otras unidades de generación en el mercado SPOT para cumplir con el contrato asociado a la planta, las horas extras del personal de mantenimiento, compra e importación de repuestos o equipos de urgencia, alquileres de equipos de elevación y personal contratista, entre otros.

Figura 1. **Tendencia de salidas de servicio no programadas y pérdidas económicas**



Fuente: elaboración propia.

### **2.3. Delimitación del Problema**

Se desarrollará el plan de mantenimiento centrado en confiabilidad aplicado a instrumentación y control de la unidad de generación de ciclo binario en el área de mantenimiento de una empresa de generación de energía eléctrica (Geotérmica) ubicada en Escuintla, Guatemala del 20 de julio de 2022 a mayo de 2023, sobre la línea de investigación de administración del mantenimiento.

### **2.4. Formulación del problema**

Esto lleva a plantear las siguientes preguntas.

#### **2.4.1. Pregunta principal**

- ¿Cuál es el plan de mantenimiento centrado en confiabilidad aplicado a instrumentación y control de la unidad de generación de ciclo binario en una planta geotérmica ubicada en el departamento de Escuintla, Guatemala?

#### **2.4.2. Preguntas secundarias**

- ¿Cómo está la situación actual de los equipos de instrumentación y control de la unidad de generación de ciclo binario?
- ¿Cuáles son los pasos para desarrollar el plan de mantenimiento centrado en confiabilidad que deben de adaptarse a la planta geotérmica?
- ¿Cuáles son los beneficios del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad adaptado a la planta?

### **3. JUSTIFICACIÓN**

El presente estudio se relaciona con la línea de investigación de Administración del Mantenimiento de la Maestría en Ingeniería de Mantenimiento de la Universidad de San Carlos de Guatemala, enfocándose en el análisis modal de fallos y efectos de los equipos de instrumentación y control de la unidad de generación de ciclo binario basándose en la metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad.

Esta investigación es de importancia para reducir el problema de las salidas de servicio no programadas por fallas en equipos de instrumentación y control de la unidad de generación, ya que al transcurrir el tiempo la vida útil de los equipos disminuye y aumenta la probabilidad de falla; por lo tanto, es necesario realizar un mantenimiento centrado en confiabilidad que cumpla con desarrollar y establecer estrategias de mantenimientos efectivos para cada equipo en la unidad.

La motivación del investigador para realizar este diseño de investigación es el deseo de aportar un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad al departamento de instrumentación y control de la planta geotérmica, así como ayudar a todo interesado en los temas descritos en el presente trabajo con un informe detallado que permita el entendimiento y desarrollo de la administración del mantenimiento aplicado a una planta de generación de energía eléctrica.

El trabajo de investigación beneficia directamente a la planta geotérmica, al personal de mantenimiento y al personal de operación, porque el propósito del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad es de mejorar las actividades de

mantenimiento extendiendo la vida útil y reduciendo la probabilidad de fallo de los equipos de la unidad de generación de ciclo binario, de igual forma se aumentaría la disponibilidad de la planta y por consiguiente aumentaría la generación de energía eléctrica y los ingresos financieros. Además, el aporte social es la disminución del precio de la energía eléctrica debido al aumento de la generación de energía eléctrica renovable entregado al sistema nacional interconectado (SNI) de Guatemala. La relación del tema objeto de estudio y la Maestría Ingeniería de Mantenimiento se da con los cursos de administración del mantenimiento, automatización de mantenimiento, seminario de mantenimiento predictivo y técnicas de ensayos no destructivos.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1. General**

- Desarrollar el plan de mantenimiento centrado en confiabilidad aplicado a instrumentación y control de la unidad de generación de ciclo binario en una planta geotérmica ubicada en el departamento de Escuintla, Guatemala.

### **4.2. Específicos**

- Determinar la situación actual de los equipos de instrumentación y control de la unidad de generación de ciclo binario.
- Identificar los pasos para desarrollar el plan de mantenimiento centrado en confiabilidad que deben de adaptarse a la planta geotérmica.
- Evaluar los beneficios del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad desarrollado.





## **5. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN**

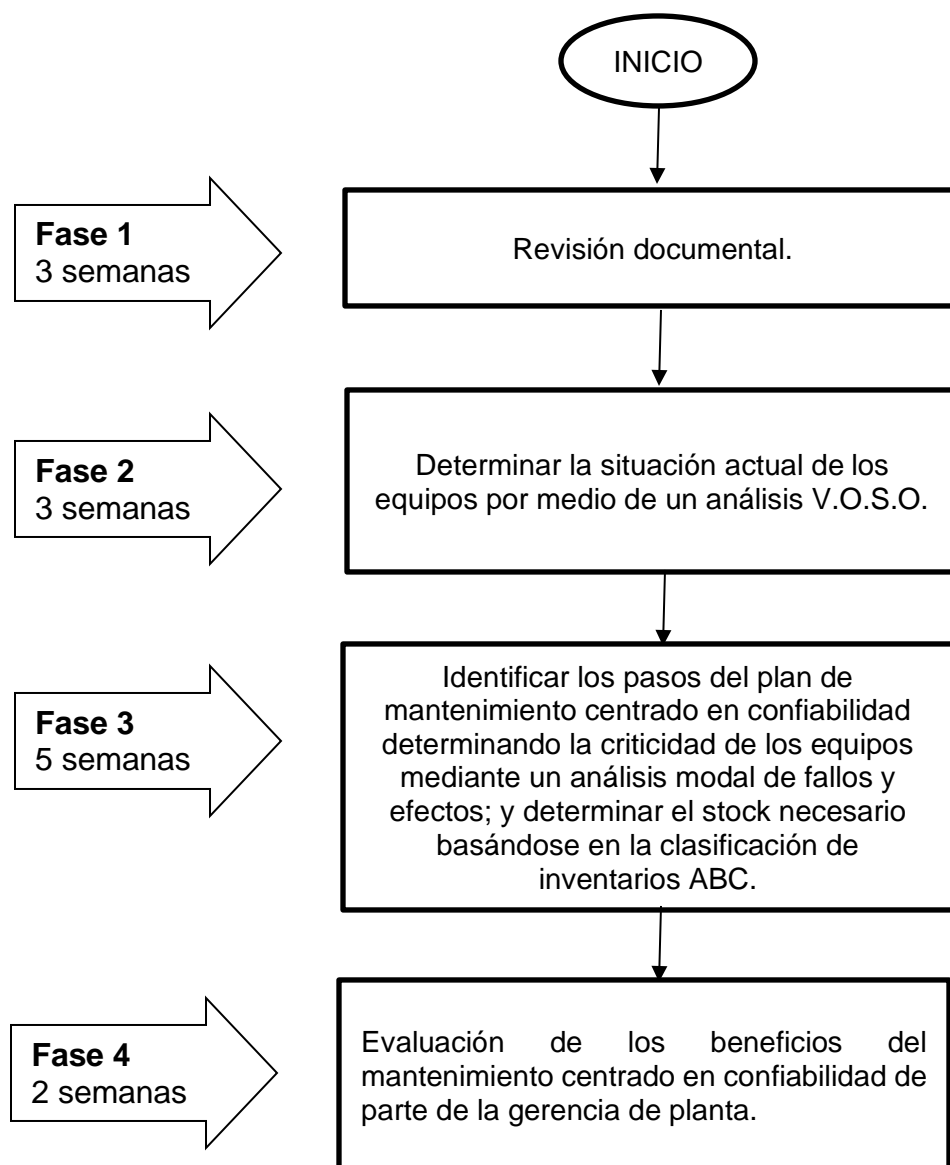
La necesidad principal para cubrir es la de reducir las salidas de servicio no programadas de la unidad de generación de ciclo binario en una planta geotérmica ubicada en el departamento de Escuintla, Guatemala; desarrollando un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad aplicado a la instrumentación y control, esperando obtener un aumento en la disponibilidad de la unidad y una mejoría en el desempeño del mantenimiento. Por consiguiente, se tendría una reducción en los costos de mantenimiento y un aumento en los ingresos económicos de la planta, debido a que no se tendría la necesidad de comprar la energía eléctrica faltante a otros generadores eléctricos en el mercado SPOT según el contrato asociado a la planta.

Alguna de las posibles causas de las salidas de servicio no programadas de la unidad de generación puede ser la mala operación debido a la desmotivación y/o insuficiente capacitación del personal operativo; otra causa y se considera la más importante a tomar en cuenta, es el fallo en equipos críticos en la unidad debido a descargas electro-atmosféricas, factores de uso de los equipos, contaminación ambiental expuesto y a un mantenimiento deficiente de la unidad.

Este estudio dará las directrices de la administración de un mantenimiento, empezando con la determinación del estado actual de los equipos de instrumentación y control, desarrollando un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad mediante un análisis de la criticidad de los equipos, determinando las tareas con mayor prioridad del mantenimiento, estableciendo la cantidad de activos físicos necesarios a tener en stock, hasta su evaluación final.

Al determinar lo anterior, se estará mejorando la calidad del servicio, la disponibilidad de la unidad y se aumentará la cantidad de energía suministrada al sistema nacional interconectado de Guatemala.

Figura 2. **Esquema de solución**



Fuente: elaboración propia.

## **6. MARCO TEÓRICO**

### **6.1. Mantenimiento industrial**

El mantenimiento industrial se caracteriza por ser el conjunto de tareas orientadas a garantizar el funcionamiento correcto de las máquinas que componen un proceso, permitiéndole llegar a su mayor rendimiento. (Olarte, Cañón y Botero, 2010)

#### **6.1.1. Historia del mantenimiento**

Según la evolución del mantenimiento industrial, se pueden mencionar las siguientes cuatro generaciones:

##### **6.1.1.1. Primera generación**

La primera generación cubre el periodo hasta la segunda guerra mundial. En esa época la industria no era altamente mecanizada, de modo que los tiempos de inactividad no tenían demasiada importancia. Esto significa que la prevención de fallas en equipos no era una prioridad en la mente de la mayoría de los gerentes. Al mismo tiempo la mayoría de los equipos eran simples y muy bien diseñados esto los hacía confiables y fáciles de reparar. (Moubray, 2004, pág. 6)

##### **6.1.1.2. Segunda generación**

A partir de la segunda guerra mundial, seguramente motivado por avances en sectores industriales, nos encontramos con otra etapa muy diferente que se ha denominado “Segunda Generación”. En ella se definen como objetivos las disponibilidades operacionales, el que los equipos duren lo máximo posible en condiciones operativas idóneas y todo ello con los costes más bajos posibles.

Ponen en marcha sistemas de mantenimiento preventivos basados en revisiones cíclicas a los equipos e instalaciones y medio en general. (González, 2005, págs. 30-31)

#### **6.1.1.3. Tercera generación**

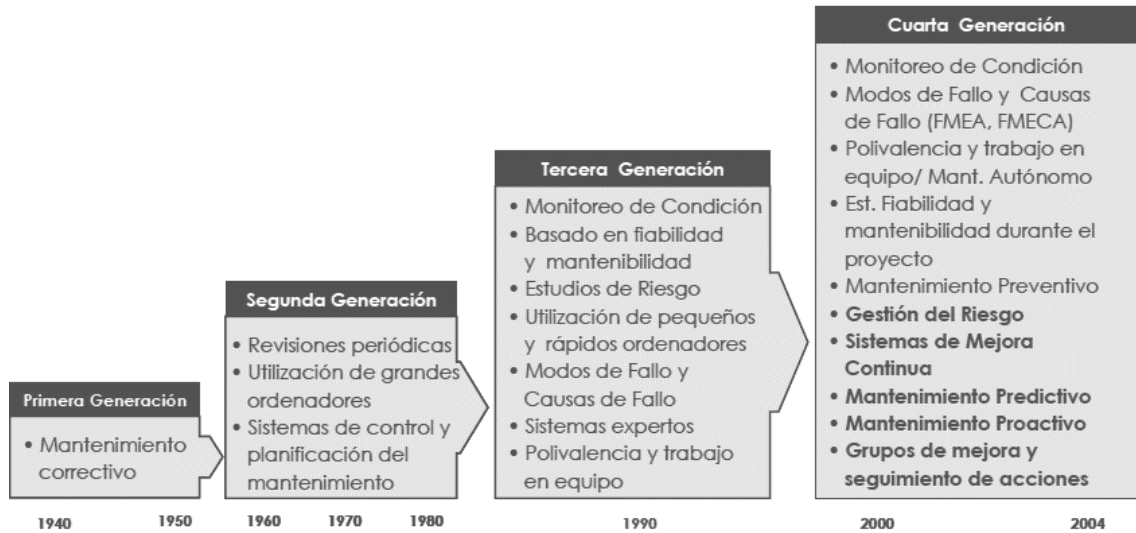
Comenzó durante la década de los setenta, cuando los cambios avanzaron rápidamente debido a los avances tecnológicos. La motorización y la automatización seguían expandiéndose, los volúmenes de producción eran altos, las salidas de servicio resultaban vitales debido a los costos por pérdidas. Los equipos se volvieron más complicados y nuestra dependencia de ellos aumentó, se requerían productos y servicios de calidad, teniendo en cuenta la seguridad y medio ambiente y se fortaleció el mantenimiento preventivo. (García, 2004, pág. 16)

#### **6.1.1.4. Cuarta generación**

Según García (2004), el nuevo enfoque de la cuarta generación se centraliza en la eliminación de las fallas utilizando métodos proactivos. A partir de este momento, no basta con eliminar los efectos del fallo; hay que encontrar la causa de la falla para eliminarla y evitar que se repita.

Del mismo modo, existe una preocupación creciente por la importancia del mantenimiento y la confiabilidad de los equipos, por lo que es fundamental tener en cuenta estas cualidades desde la fase de diseño del proyecto. Otro aspecto importante es la implementación de sistemas de mejora continua en los planes de mantenimiento preventivo y predictivo del proceso. (García, 2004, pág. 17)

Figura 3. **Evolución de las técnicas de mantenimiento**



Fuente: García (2004) *Mantenimiento centrado en confiabilidad*.

## 6.1.2. Tipos de mantenimiento

A continuación, se describen los tipos de mantenimiento relevantes dentro de la industria.

### 6.1.2.1. Mantenimiento correctivo

Las actividades se desarrollan por una avería imprevista y son ejecutadas con urgencia para lo más pronto posible corregirla. Este tipo de mantenimiento genera un alto costo, porque al momento de existir una detención en los equipos, provoca gran cantidad de pérdidas en la producción de acuerdo al tiempo de parada en los equipos hasta que se pueda realizar la reparación. (Suárez, 2018, pág. 12)

También, se necesita de un stock adecuado de las piezas o equipos existentes de la planta para poder solucionar o reparar las necesidades

imprevistas de una falla o tener disponibles equipos de respaldo que funcionen cuando ocurra una falla.

#### **6.1.2.2. Mantenimiento preventivo**

Fuentes (2018) concluye que "Todos los trabajos y actividades de conservación que garanticen que no se produzcan fallas en los equipos para seguir brindando disponibilidad, deben ser catalogados como mantenimiento preventivo". (pág. 4).

Este tipo de mantenimiento es siempre programable y existen numerosos métodos en el mundo para llevarla a cabo, con la intención de evitar salidas no programadas por fallas en los equipos. (Fuentes, 2018)

#### **6.1.2.3. Mantenimiento predictivo**

Castillo (2017) indica que lo interesante de esta metodología es que está basado en su totalidad en descubrir una falla antes que suceda, con el propósito de corregir sin que el proceso se detenga ni afecte el uso de las instalaciones o en su defecto de los instrumentos. Es importante mencionar que para esta metodología de mantenimiento es necesario y vital contar con instrumentos que ayuden a diagnosticar, así como aparatos de pruebas no destructivas, como análisis de lubricantes, cámaras termográficas, entre otros. (pág. 32)

#### **6.1.2.4. Mantenimiento centrado en confiabilidad**

Según Cruzado (2020): es una metodología utilizada para decidir el mantenimiento más productivo y efectivo que garantice que todos los equipos sigan trabajando en un alto grado de confiabilidad. No se trata de otro plan de mantenimiento, sino de una combinación de procedimientos de mantenimiento

convencionales con una forma incorporada de tratar de anticiparse a las fallas o disminuir sus consecuencias a un mínimo costo. (pág. 19)

Según Moubray (2004), la metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad nos lleva a responder las siete preguntas siguientes sobre el proceso a analizar:

- ¿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 ocasiona cada falla funcional?
- ¿Qué sucede cuando se produce cada falla en particular?
- ¿De qué modo afecta cada falla?
- ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada falla?
- ¿Qué debe hacerse si no se encuentra el plan de acción apropiado? (pág. 11)

#### **6.1.2.5. Fallas funcionales**

Vera (2018) considera que una falla es funcional cuando un componente o equipo funciona fuera de los límites determinados como normales, por ejemplo, en el momento en que deja de cumplir su objetivo principal. (pág. 87)

Las fallas funcionales simplemente indican la incapacidad del equipo de realizar una función deseada, pero no explican las causas de la ocurrencia de estas.

##### **6.1.2.5.1. Modo de falla**

Vera (2018) define que: el modo de falla es la causa que podría haber provocado o iniciado cada situación de falla. Además, se consideran los modos

de falla que se producen en equipos equivalentes en el mismo proceso, así como los modos de falla percibidos actualmente en los sistemas de mantenimiento existentes. (pág. 88)

Según Moubray (2004), las listas de modos de fallas más tradicionales, incorporan fallas causadas por el deterioro o el uso y desgaste normal. Sin embargo, también puede incluir fallas causadas por errores humanos (en parte por operarios y personal de mantenimiento) o por desperfectos de diseño de modo que los posibles causantes de fallas en equipos pueden ser identificados y manejados apropiadamente. (pág. 13)

#### **6.1.2.5.2. Efectos de las fallas**

Montoya (2017) muestra que para cada modo de falla se reconocen los impactos de la falla, donde se demuestra que ocurre cuando la falla sucede y se evalúan sus consecuencias, antes de caracterizar el modo de falla en cualquier categoría es importante responder las preguntas siguientes:

- ¿La falla presenta síntomas evidentes antes de suceder?
- ¿Se muestra alguna alarma durante la falla?
- ¿Cuál es la velocidad de degradación de la falla?
- ¿La falla pone en riesgo la integridad de las personas o equipos?
- ¿Hay riesgos de explosión o electrocución?
- ¿La falla pondría en riesgo el prestigio de la empresa o a la misma empresa?
- ¿Hay posibles consecuencias en el medio ambiente?
- ¿Se puede detectar la falla? (págs. 18-19)



#### **6.1.2.5.3. Consecuencia de las fallas**

Vera (2018) indica que los resultados de estas fallas pueden ayudarnos a establecer la necesidad de las tareas de mantenimiento que se esperan que minimicen o eliminen la falla y define si es razonable algún tipo de intervención o en el peor escenario, justificar una posible modificación en el diseño para prevenir lesiones personales, daños naturales o daños en el proceso. (págs. 90-91)

Moubray (2004), cataloga las consecuencias en los siguientes grupos:

- Consecuencias de fallas ocultas.
- Consecuencias medioambientales y de seguridad.
- Consecuencias operativas:
- Consecuencias no operativas. (pág. 14)

#### **6.1.2.5.4. Análisis modal de fallos y efectos (AMFE)**

Según Cruzado (2020) es una estrategia eficiente que permite distinguir las fallas funcionales antes de que ocurran y que pueden dañar los equipos de cierto proceso. A través del AMFE, se obtienen los datos importantes para tener la opción de elegir de forma adecuada las tareas de mantenimiento que impidan o minimicen las fallas al tomar en cuenta cada modo de falla de forma independiente. (págs. 22-23)

Los datos importantes que deben recopilarse para concluir un AMFE correcto contienen lo siguiente: las funciones primarias y secundarias, las fallas funcionales, los modos de fallas relacionados con las fallas funcionales, la descripción de los impactos de cada falla y las consecuencias relacionados con esos impactos. (Cruzado, 2020, págs. 22-23)

#### **6.1.2.5.5. Análisis de criticidad**

Según Cruzado (2020) es una estrategia que ayuda a concluir, dentro de una escala indicada por el analista, la criticidad o importancia de un equipo o instrumento dentro de un proceso o planta. Contiene criterios específicos que permiten evaluar la criticidad debido a las consecuencias cuando entra en una condición de falla. (págs. 23-24)

Esto beneficia a la organización que desea utilizar el mantenimiento centrado en confiabilidad, ya que le permite reconocer los equipos o procesos que requieren un mantenimiento detallado y preciso, y así poder mejorar los recursos. (Cruzado, 2020)

### **6.1.3. Gestión de mantenimiento**

Es el proceso encargado de supervisar las actividades de mantenimiento enfocadas en optimizar los recursos y minimizar las pérdidas o fallas en los equipos.

#### **6.1.3.1. Plan de mantenimiento**

Consiste en el grupo de tareas de mantenimiento planeadas y agrupadas con la finalidad de predecir o evitar fallas por averías para lograr la disponibilidad, rentabilidad y aumentar al máximo la vida útil de los instrumentos. (Ruiz, 2021, pág. 29)

#### **6.1.3.2. Objetivos**

El objetivo general de un plan de mantenimiento según Achahuanco (2020) es la de diseñar una guía que sirva para planear, organizar, dirigir y controlar adecuadamente las labores de mantenimiento preventivo y predictivo con el fin

de alargar la vida útil de la inversión y mantener el mayor tiempo posible una edificación con todos los sistemas complementarios operativos y funcionales. Evitar detenciones o interferencias producto de las paradas generales imprevistas o forzadas que afectan el proceso productivo.

### **6.1.3.3. Indicadores de mantenimiento**

Los indicadores de mantenimiento evalúan las condiciones del funcionamiento de los procesos. De esta manera será posible llevar a cabo un plan de mantenimiento adecuado para cumplir su propósito. (Zapata, 2009)

Según Villa y Vernaza (2020), los indicadores de gestión de mantenimiento para utilizar en la empresa son muy variados, se debe categorizar y utilizar, acorde a lo que se quiere evaluar. (págs. 17-18)

Además, hay que tener en cuenta que en la mayoría de los casos es necesario adaptarlos a cada planta de generación, efectuando modificaciones que hagan que los indicadores seleccionados estén adaptados a las necesidades concretas de información. (Villa y Vernaza, 2020)

#### **6.1.3.3.1. Disponibilidad**

Es la probabilidad que el equipo funcione aceptablemente en el momento en que se espera tras el inicio de su actividad, cuando se utiliza en situaciones estables. Esto indica el tiempo en que el equipo está preparado para ponerse en marcha. (Villa y Vernaza, 2020, págs. 18-19)

Según Villa y Vernaza (2020) los componentes involucrados en la disponibilidad son los siguientes:

- Número de horas totales de producción.
- Número de horas de indisponibilidad (paradas por mantenimiento).

Figura 4. **Fórmula de disponibilidad**

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Horas Totales} - \text{Horas parada por mantenimiento}}{\text{Horas Totales}} \quad (\text{Fórmula 1})$$

Fuente: Villa y Vernaza (2020), *Análisis de indicadores de confiabilidad para las centrales eléctricas de generación de EPM.*

#### 6.1.3.3.2. **Tiempo medio entre fallas**

MTBF (*Mean Time Between Failure*), y según Villa y Vernaza (2020) permite encontrar el tiempo entre las ocurrencias de dos o más fallas:

Figura 5. **Fórmula de tiempo medio entre fallas**

$$\text{MTBF} = \frac{\text{No. de Horas totales del periodo de tiempo analizado}}{\text{No. de averías}} \quad (\text{Fórmula 2})$$

Fuente: Villa y Vernaza (2020), *Análisis de indicadores de confiabilidad para las centrales eléctricas de generación de EPM.*

#### 6.1.3.3.3. **Tiempo medio de reparación**

MTTR (*Mean Time To Repair*), según Villa y Vernaza (2020) es el tiempo que se invierte en reparar una falla y hacer que un equipo funcione nuevamente:

Figura 6. **Fórmula de tiempo medio de reparación**

$$MTTR = \frac{\text{No. de horas de paro por avería}}{\text{No. de averías}} \quad (\text{Fórmula 3})$$

Fuente: Villa y Vernaza (2020), *Análisis de indicadores de confiabilidad para las centrales eléctricas de generación de EPM.*

#### **6.1.3.3.4. Confiabilidad**

Describe la probabilidad de que un equipo o proceso, no fracase durante el tiempo de funcionamiento bajo ciertas condiciones de trabajo. Por lo que la confiabilidad relaciona la recurrencia con la que se producen las fallas en el tiempo. (Villa y Vernaza, 2020)

## **6.2. Energía Eléctrica**

Es una forma de energía que se puede generar de diversas fuentes, tanto de recursos renovables como no renovables.

### **6.2.1. Energía renovable**

Los recursos energéticos renovables se definen como aquellos recursos que tienen como característica común que no se terminan, o que se renuevan por naturaleza. Dentro de estos recursos se tienen las energías hidráulicas, geotérmicas, eólicas, solar (térmica y fotovoltaica) y la biomasa (leña, carbón vegetal, bagazo de caña de azúcar, biocombustibles y residuos urbanos, forestales, agrícolas y estiércol). (Las energías renovables en la generación eléctrica en Guatemala, 2018)

### **6.2.1.1. Energía geotérmica**

Geotermia es una palabra de origen griego, deriva de “geos” que quiere decir tierra, y de “*thermos*” que significa calor: el calor de la Tierra. Se emplea indistintamente para designar tanto a la ciencia que estudia los fenómenos térmicos internos del planeta como al conjunto de procesos industriales que intentan explotar ese calor para producir energía eléctrica y/o calor útil al ser humano. (Llopis y Rodrigo, 2008, pág. 14).

La investigación de “análisis de la energía geotérmica de baja temperatura en terrenos volcánicos” (Expósito, 2015) clasifica los reservorios geotérmicos según su nivel de temperatura:

#### **6.2.1.1.1. Reservorios de muy baja temperatura**

Se trata de la energía almacenada en el suelo a temperaturas inferiores a 30 °C. En cualquier momento es posible captar y utilizar la energía calorífica en las capas superficiales de la tierra; para la climatización de casas y edificios. (Expósito, 2015)

#### **6.2.1.1.2. Reservorios de baja temperatura**

Temperaturas entre 30 y 90 °C. Se localizan habitualmente en zonas con un gradiente geotérmico normal a profundidades entre 1,500 y 23,500 metros o a profundidades inferiores a los 1,000 metros en zonas con un gradiente geotérmico más elevado. (Expósito, 2015).

### 6.2.1.1.3. Reservorios de media temperatura

Temperaturas entre 90 y 150 °C. Se diferencian de los reservorios de alta temperatura en que no existe capa impermeable sobre el acuífero que mantenga el calor y la presión en el reservorio; se aprovechan en plantas de generación eléctrica. (Expósito, 2015)

### 6.2.1.1.4. Reservorios de alta temperatura

Su temperatura es superior a los 150 °C. Son zonas que pueden coincidir con fenómenos geológicos notables (actividad sísmica elevada, actividad volcánica, entre otros) Se sitúan a profundidades entre 1,500 y 3,000 m. Pueden estar constituidos por vapor seco, mixtos y salmuera. (Expósito, 2015)

En la tabla I se observa la clasificación de los diferentes tipos de reservorios geotérmicos según su rango de temperatura e indicando su uso principal.

TABLA I. Clasificación de los reservorios geotérmicos

Tipo de reservorio	Rango de temperatura	Uso principal
Muy baja temperatura	< 30°C	Climatización
Baja temperatura	30 < T < 90°C	Balnearios
Media temperatura	90 < T < 150°C	Generación de energía eléctrica Ciclos binarios
Alta temperatura	> 150°C	Generación de energía eléctrica

Fuente: elaboración propia.

### **6.2.1.2. Tipos de plantas geotérmicas**

En relación con las plantas geotérmicas, existen diferentes tipos de configuración dependiendo del recurso geotérmico.

#### **6.2.1.2.1. Plantas tipo “*Single flash*”**

Las centrales de “*single flash*” son el pilar de la industria de la energía geotérmica. Este tipo de plantas se introducen en su mayor parte cuando hay un reservorio geotérmico que está compuesto predominantemente por salmuera. El rendimiento energético de estas plantas oscila entre los 3 y los 90 MW por unidad, con una media de 25 MW. (Cárcamo y Rivera, 2016, pág. 7)

#### **6.2.1.2.2. Plantas tipo “*Double flash*”**

Las plantas “*double flash*” superan en eficiencia a las plantas “*single flash*”, ya que pueden generar entre un 15 y un 25 % más de electricidad con los mismos recursos geotérmicos. Estas plantas son más complicadas, costosas y requieren más mantenimiento, pero la potencia adicional podría cubrir dicha inversión. La potencia eléctrica de este tipo de plantas varía entre 4,7 y 110 MW por unidad y lo normal es alrededor de 32 MW por unidad. (Cárcamo y Rivera, 2016, pág. 9)

#### **6.2.1.2.3. Planta tipo binario**

Según Encarnación (2018):

Las centrales de ciclo binario son las más cercanas en principio termodinámico a las centrales térmicas convencionales o nucleares, en las que el fluido motriz pasa por un ciclo cerrado. El fluido motriz, elegido por sus propiedades termodinámicas de bajo punto de ebullición, principalmente suele ser un fluido natural; por ello, los ciclos binarios también se denominan Ciclo de Rankine Orgánico. (pág. 5)

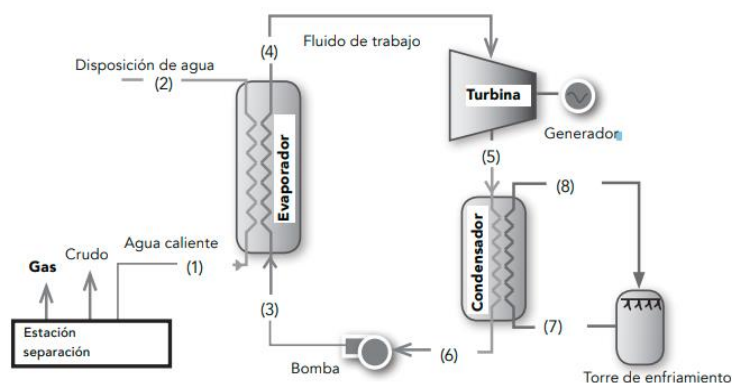


Los procesos que experimenta el fluido motriz son exactamente los de un ciclo Rankine convencional: se transfiere calor del fluido geotérmico y se evapora, luego se expande a través de una turbina, posteriormente se condensa y se devuelve al vaporizador por medio de una bomba de alimentación. (Encarnación, 2018, pág. 5)

#### 6.2.1.2.4. Ciclo de Rankine

La diferencia está en que es necesario la utilización de un fluido motriz. La figura 7 muestra un ciclo de Rankine. Para este caso, la fuente de calor es el recurso geotérmico extraído de los pozos de producción (1), el cual después de transferir el calor al fluido motriz se inyectan a pozos de reinyección (2). El fluido motriz líquido ingresa al vaporizador (3), donde se evapora a alta presión y temperatura para poder ingresar a la turbina del generador (4), después se dirige al condensador a baja presión y temperatura (5), para ser condensado y bombeado por las bombas de alimentación (6) de regreso al vaporizador. La fuente fría (7) requerida en el condensador, se obtiene por medio del aire (8).

Figura 7. Ciclo de Rankine



Fuente: Revista EIA (2015), *Estudio de factibilidad para la implementación de un ciclo orgánico de rankine en pozos de extracción de petróleo.*

### **6.3. Reseña histórica de planta geotérmica**

La planta geotérmica ubicada en Escuintla a 42 km de la ciudad de Guatemala es una planta de generación de energía eléctrica limpia que aprovecha el calor interior de la tierra y forma parte de una empresa líder en el sector geotérmico a nivel internacional que explora, diseña, desarrolla, construye y opera plantas de este tipo en el mundo, teniendo dos de ellas en el territorio guatemalteco; inició su operación comercial en el año 2007 y consta de una unidad de 1.2 MW de vapor y dos unidades de 12 MW cada una de ciclo binario, teniendo una capacidad instalada de 25.2 MW.

## 7. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS ORIENTADORAS

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO REFERENCIAL

2. MARCO TEORICO

2.1. Mantenimiento industrial

2.1.1. Historia del mantenimiento

2.1.1.1. Primera generación

2.1.1.2. Segunda generación

2.1.1.3. Tercera generación

2.1.1.4. Cuarta generación

2.1.2. Tipos de mantenimiento

2.1.2.1. Mantenimiento correctivo

2.1.2.2. Mantenimiento preventivo

2.1.2.3. Mantenimiento predictivo

2.1.2.4. Mantenimiento centrado en confiabilidad

- 2.1.2.4.1. Modos de falla
      - 2.1.2.4.2. Efectos de las fallas
      - 2.1.2.4.3. Consecuencias de las fallas
      - 2.1.2.4.4. Análisis modal de fallos y efectos (AMFE)
      - 2.1.2.4.5. Análisis de criticidad
    - 2.1.3. Gestión del mantenimiento.
      - 2.1.3.1. Plan de mantenimiento
      - 2.1.3.2. Objetivos
      - 2.1.3.3. Indicadores de mantenimiento
        - 2.1.3.3.1. Disponibilidad
        - 2.1.3.3.2. Tiempo medio entre fallas
        - 2.1.3.3.3. Tiempo medio de reparación
        - 2.1.3.3.4. Confiabilidad
- 2.2. Energía Eléctrica
  - 2.2.1. Energía renovable
    - 2.2.1.1. Energía geotérmica
      - 2.2.1.1.1. Reservorios de muy baja temperatura
      - 2.2.1.1.2. Reservorios de baja temperatura
      - 2.2.1.1.3. Reservorios de media temperatura
      - 2.2.1.1.4. Reservorios de alta temperatura
  - 2.2.2. Tipos de plantas geotérmicas
    - 2.2.2.1.1. Plantas tipo “Single flash”

2.2.2.1.2. Plantas tipo “Double  
flash”

2.2.2.1.3. Planta tipo binario

2.2.2.1.4. Ciclo de Rankine

2.3. Reseña histórica de planta geotérmica

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APENDICES



## **8. METODOLOGÍA**

En esta sección se presenta la metodología de la investigación en donde se describe el enfoque, diseño, tipo de estudio, alcance, variables e indicadores, fases y resultados esperados.

### **8.1. Enfoque**

El enfoque del estudio propuesto es cualitativo, ya que se realiza un análisis de la criticidad de los equipos de instrumentación y control en la unidad de generación aplicando un análisis modal de fallos y efectos; Además, el gerente de planta evaluará los beneficios del plan de mantenimiento determinando si es factible o viable.

### **8.2. Diseño de la investigación**

El presente diseño de investigación es no experimental porque la información se basa en sucesos que ocurrieron con anterioridad. La información se obtiene mediante herramientas de análisis con la finalidad de gestionar el mantenimiento de la unidad de generación por medio de la criticidad de los equipos.

### **8.3. Tipo de estudio**

Se ha seleccionado un tipo de estudio descriptivo, el cual pretende responder las interrogantes del presente estudio, basado en la situación actual de los equipos, luego efectuar un análisis de criticidad, para poder aplicar la

metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad y posteriormente evaluar los beneficios del plan de mantenimiento propuesto.

#### **8.4. Alcance del estudio**

El alcance metodológico es descriptivo, porque se tiene disponible la información del proceso actual, lo que permite tomar datos mediante una revisión documental para evaluar y conocer a detalle las fallas de los equipos de la unidad de generación.

#### **8.5. Variables e indicadores**

Las variables en estudio se describen en la tabla II que se presenta a continuación:



TABLA II. Operacionalización de variables

Objetivo específico	Nombre de la variable	Tipo de variable	Indicadores	Técnicas e Instrumentos
<b>Determinar la situación actual de los equipos de instrumentación y control de la unidad de generación de ciclo binario.</b>	Determinación de la situación actual de los equipos.	Cualitativa	Fugas.	Técnica V.O.S.O.
			Corrosión o incrustación.	Formato de inspección (anexo 3).
			Vibraciones.	
			Recalentamiento.	
			Ruidos.	
			Entre otros.	
<b>Identificar los pasos para desarrollar el plan de mantenimiento o centrado en confiabilidad que deben de adaptarse a la planta geotérmica.</b>	Identificación de los pasos para desarrollar el plan de mantenimiento.	Cualitativa	Programación de mantenimiento s.	Análisis modal de fallos y efectos. Formato AMFE (anexo 4).
			Inventario de equipos.	Análisis de criticidad.
			Control de consumibles y repuestos.	Formato de criticidad (anexo 5).
			Planes de mantenimiento predictivos y preventivos.	Inventario ABC. Clasificación de inventarios ABC.
			Indicadores de mantenimiento	

Continuación tabla II.

---

<b>Evaluar los beneficios del plan de mantenimiento o centrado en confiabilidad desarrollado.</b>	Evaluación de los beneficios del plan de mantenimiento.	Cualitativa	Factibilidad Viabilidad	El gerente de planta evaluará la propuesta del mantenimiento centrado en confiabilidad y determinará si es factible.
---	---	-------------	----------------------------	--

---

Fuente: elaboración propia

## **8.6. Fases del estudio**

El proceso para cumplir con los objetivos del diseño de investigación debe llevarse a cabo de la siguiente forma:

Fase 1: revisión documental para realizar la investigación de antecedentes del problema y marco teórico relacionado al mismo. El tiempo de duración para la presente fase es de 3 semanas.

Fase 2: realizar un listado de todos los equipos de instrumentación y control y determinar la situación actual de los equipos mediante un formato de inspección (anexo 3) aplicando un análisis V.O.S.O. en la unidad de generación. El tiempo de duración para esta fase será de 3 semanas.

Fase 3: determinar la criticidad de los equipos de instrumentación y control de la unidad de generación por medio de un formato AMFE (anexo 4 y 5) aplicando un análisis modal de fallos y efectos que permita proponer una metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad, elaborando formatos de inspección y calibración de dicha unidad; e identificando que equipos y repuestos son necesarios de mantener en stock según la clasificación de inventarios ABC. El tiempo de duración para esta fase será de 5 semanas.

Fase 4: evaluación de resultados de parte de la gerencia de planta, verificando la factibilidad y viabilidad del diseño del plan mantenimiento centrado en confiabilidad. El tiempo de duración para la presente fase será de 2 semanas.

## 8.7. Resultados esperados

Al final del estudio se obtendrá un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad aplicado a instrumentación y control que permitirá reducir el problema principal de las salidas de servicio no programadas por fallas en los equipos de las unidades de generación de ciclo binario de la planta geotérmica ubicada en Escuintla, Guatemala.

## 8.8. Población y muestra

Se determina la población y muestra según la cantidad de equipos instalados en la unidad de generación.

### 8.8.1. Población “N”

La población está determinada por el conjunto de equipos de instrumentación y control de la unidad de generación de ciclo binario, por lo tanto, se obtiene una población finita de 112 equipos en total.

### 8.8.2. Muestra “n”

La muestra de la unidad de análisis es grande debido a que N es mayor que 30 elementos, por consiguiente, será necesario calcular la muestra apropiada para el presente estudio utilizando la siguiente fórmula:

Figura 8. **Formula muestral para una población finita**

$$n = \frac{Npqk^2}{e^2N + pqk^2} \quad (\text{Fórmula 4})$$

Fuente: Castellanos (2007), *El muestreo probabilístico como instrumento de medición en investigaciones de mercado en una empresa de servicios de marketing.*

En donde:

$N$  = Tamaño de la población.

$n$  = Tamaño de la muestra.

$p$  = Probabilidad de éxito.

$q$  = Probabilidad de fracaso.

$k$  = Valor  $K$  al nivel de confianza asumido en el diseño muestral.

$e$  = Error relativo máximo esperado.

Eligiendo un nivel de confianza del 90 %, seleccionando un margen de error del 5 % y una probabilidad de éxito del 50 %; se obtiene una muestra de 80 equipos de instrumentación y control a analizar en la unidad de generación de ciclo binario.



## 9. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Las herramientas que se emplearan para el análisis de la información que aporten a la investigación las respuestas a las interrogantes y objetivos planteados son los siguientes.

Objetivo 1: situación actual de los equipos de instrumentación y control de la unidad de generación de ciclo binario:

- Se realizará una matriz descriptiva en base a un análisis V.O.S.O tomando como indicadores fugas, corrosión o incrustación, vibraciones, recalentamiento, ruidos, entre otros.

Objetivo 2: pasos para desarrollar un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad que deben de adaptarse a la planta geotérmica:

- Se realizará una matriz de fallas y efectos en base a un análisis modal de fallos y efectos para identificar los equipos potencialmente débiles.
- Se continuará con una matriz de riesgo en base al análisis de criticidad de los equipos para definir la jerarquía de los activos.
- Seguidamente por medio de una tabla se indicarán los activos físicos necesarios a tener en stock en base a un análisis de inventarios ABC.
- Y de forma descriptiva se mostrará la programación de mantenimientos, los planes de mantenimientos predictivos y preventivos que deben de adaptarse a la planta.

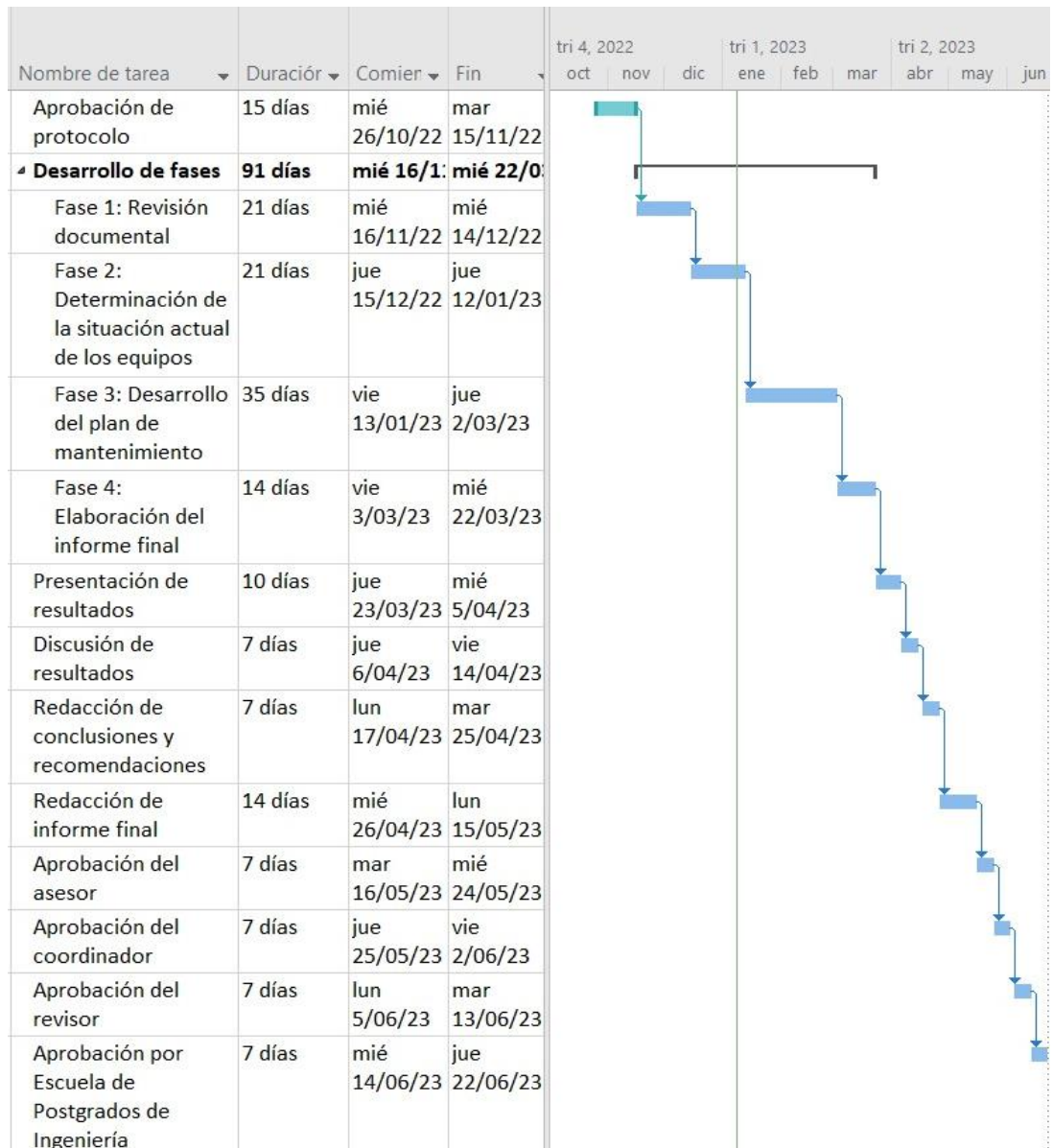
Objetivo 3: beneficios del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad desarrollado:

- Se indicará de forma descriptiva si el diseño del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad es factible o viable según los resultados de la entrevista al gerente de planta.



## 10. CRONOGRAMA

Figura 9. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia.



## 11. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El trabajo de investigación será factible debido a que se cuenta con los recursos propios del investigador y el apoyo financiero de la planta geotérmica para poder cumplir con los objetivos planteados, teniendo en cuenta que al analizar la factibilidad del estudio se consideran los recursos humanos, materiales, físicos, tecnológicos, equipos e imprevistos.

- Humanos: se tendrá el apoyo del personal de operación para realizar las inspecciones requeridas, del operador de la maquinaria de elevación para las inspecciones de los equipos en alturas y del bodeguero para determinar el stock actual de los equipos. También se tendrá el apoyo del asesor del trabajo de investigación aportando sus conocimientos y experiencia en administración de mantenimiento.
- Materiales: se hará uso de papel y tóner para la impresión de los formatos de inspección, y se compraran etiquetas M21 para colocar en los equipos inspeccionados.
- Físicos: se utilizará el vehículo del investigador como medio de transporte al sitio y de la maquinaria de elevación para inspeccionar los equipos en alturas cuando sea necesario.
- Tecnológicos: se comprará una laptop para el uso del personal de mantenimiento, además se adquirirá un software de mantenimiento.
- Equipos: se adquirirá una cámara termográfica para la inspección de los equipos y una etiquetadora M21 para la colocación de etiquetas.

En la tabla III se presenta el presupuesto para la elaboración de este trabajo de investigación.

**TABLA III. Presupuesto**

	<b>Ítem</b>	<b>Costo</b>	<b>Fuente de financiamiento</b>	<b>Porcentaje</b>
Recurso Humano	Asesor del trabajo de investigación	Q2,500.00	Propio	3.03%
	Investigador	Q0.00	Propio	0.00%
	Personal de operación	Q12,000.00	Por la industria	14.54%
	Operador de maquinaria	Q5,000.00	Por la industria	6.06%
	Bodeguero	Q3,500.00	Por la industria	4.24%
Recursos Materiales	Resma de papel	Q100.00	Por la industria	0.12%
	Tóner para impresora	Q200.00	Por la industria	0.24%
	Etiquetas M21 (1/2" y 3/4")	Q1,200.00	Por la industria	1.45%
Recursos Físicos	Vehículo (depreciación y combustible)	Q2,500.00	Propio	3.03%
	Maquinaria de elevación (depreciación y combustible)	Q3,000.00	Por la industria	3.64%
Recursos Tecnológicos	Servicio telefónico y de internet	Q900.00	Propio	1.09%
	Servicio de energía eléctrica	Q500.00	Propio	0.61%
	Computadora	Q5,000.00	Por la industria	6.06%
	Software de mantenimiento y Licencia	Q10,000.00	Por la industria	12.12%
Equipo	Cámara termográfica	Q30,000.00	Por la industria	36.35%
	Etiquetadora M21	Q2,000.00	Por la industria	2.42%
Varios	Imprevistos (5%)	Q4,125.00	Propio	5.00%
<b>Total</b>		<b>Q82,525.00</b>		<b>100%</b>

Fuente: elaboración propia.

El 12.75 % del recurso financiero necesario para realizar el estudio de investigación será cubierto por recursos propios del investigador.

## 12. REFERENCIAS

1. Achahuanco, A. (2020). Análisis del mantenimiento centrado en la confiabilidad – RCM – en la subestación San José, para la estabilidad del sistema interconectado nacional SEIN, en base a la confiabilidad de sus equipos (tesis de maestría). Universidad Católica de Santa María de Arequipa, Perú. Recuperado de <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/9925>
2. Cárcamo, E. & Rivera, A. (2016). *Diseño conceptual de un sistema híbrido integrado de simple flash - binario para una planta geotérmica*. Diplomado en Geotermia para América Latina 2016, Universidad de El Salvador, El Salvador Recuperado de <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/17103/1/Dise%C3%B1o%20conceptual%20de%20planta%20geot%C3%A9rmica%20tipo%20binaria%20para%20producci%C3%B3n%20de%20electricidad.pdf>
3. Castellanos, L (2007). El muestreo probabilístico como instrumento de medición en investigaciones de mercado en una empresa de servicios de marketing (tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/03/03\\_3095.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/03/03_3095.pdf)
4. Castillo, J. (2017). Diseño de investigación del desarrollo de un plan de mantenimiento basado en el modelo de gestión de calidad TPM, con enfoque sistemático para equipos críticos dentro de una edificación y sus instalaciones (tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de

Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/12463/>

5. Cruzado, R. (2020). Aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) a bombas de carga en una refinería (tesis de pregrado). Universidad de Piura, Perú. Recuperado de <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/4479>
6. Dirección General de Energía (DGE) (2018). *Las energías renovables en la generación eléctrica en Guatemala*. Ministerio de Energía y Minas (MEM). Recuperado de <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2018/07/Energ%C3%ADas-Renovables-en-Guatemala.pdf>
7. Encarnación, J. (2018). Diseño básico y de detalle de un ciclo binario de evaporación instantánea de 10 kWe netos para el aprovechamiento de remanentes energéticos (tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de [https://repositorio.unam.mx/contenidos/ficha/disenio-basico-y-de-detalle-de-un-ciclo-binario-de-evaporacion-instantanea-de-10-kwe-netos-para-el-aprovechamiento-de-rem-300768?c=eagmGe&d=false&q=\\*&i=1&v=1&t=search\\_1&as=0](https://repositorio.unam.mx/contenidos/ficha/disenio-basico-y-de-detalle-de-un-ciclo-binario-de-evaporacion-instantanea-de-10-kwe-netos-para-el-aprovechamiento-de-rem-300768?c=eagmGe&d=false&q=*&i=1&v=1&t=search_1&as=0)
8. Exposito, M. (2015). Análisis de la energía geotérmica de baja temperatura en terrenos volcánicos. Aplicaciones a la construcción en Tenerife (tesis doctoral). Universidad de Alicante, España. Recuperado de <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/53668>

9. Fuentes, E. (2018). Sistematización del modelo de mantenimiento de una planta de corte y doble, con enfoque a indicadores de disponibilidad con base a la herramienta mantenimiento centrado en la confiabilidad (mcc) (tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/10917/>
10. Gandur, F. (2017). Adaptación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en un sistema crítico de aire acondicionado de la Clínica Universitaria Bolivariana (CUB) (tesis de maestría). Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, Colombia. Recuperado de <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/3577>
11. García, J. (2004). Mejora en la confiabilidad operacional de las plantas de generación de energía eléctrica: desarrollo de una metodología de gestión de mantenimiento basado en el riesgo (RBM) (tesis de maestría). Universidad Pontificia Comillas de Madrid, España.
12. García, O. (2006). *El mantenimiento general*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia. Educación virtual. p.1. Recuperado de <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/1297>
13. González, F. (2005). Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado. Madrid, España: FUNDACIÓN CONFEMETAL. Recuperado de [https://www.academia.edu/42058714/Teor%C3%ADa\\_y\\_Pr%C3%A1ctica\\_del\\_Mantenimiento\\_Industrial\\_Avanzado](https://www.academia.edu/42058714/Teor%C3%ADa_y_Pr%C3%A1ctica_del_Mantenimiento_Industrial_Avanzado)

14. Hung, Alberto J. (agosto, 2009). Mantenimiento centrado en confiabilidad como estrategia para apoyar los indicadores de disponibilidad y paradas forzadas en la Planta Oscar A. Machado EDC. *Ingeniería Energética*, 13-19.
15. Llopis, G. & Rodrigo, V. (2008). Guía de la energía geotérmica. *Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid*, 26-33. Recuperado de <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2008/01/Guia-de-la-Energia-Geotermica-fenercom-2008.pdf>
16. Martínez, L. (2014). Metodología para la definición de tareas de mantenimiento basado en confiabilidad, condición y riesgo aplicada a equipos del sistema de transmisión nacional (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/51759>
17. Maya, J. (2018). Aplicación de RCM como estrategia de implementación de mantenimiento predictivo para la metodología TPM (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/64727>
18. Montoya, C. (2017). Aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad en el sistema de excitación de un generador sincrónico utilizando el software IRCMS (tesis de maestría). Universidad EAFIT de Medellín, Colombia. Recuperado de <https://repository.eafit.edu.co/xmlui/handle/10784/12245>



19. Moubray, J. (2004). *Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)*. Asheville, North Carolina USA: Aladon LLC.
20. Olarte C., William, & Cañon A., Benhur, & Botero A., Marcela (abril, 2010). Importancia del mantenimiento industrial dentro de los procesos de producción. *Scientia Et Technica*, XVI (44), 354-356. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/849/84917316066.pdf>
21. Ruiz, C. (2021). Diseño de investigación de un plan de mantenimiento predictivo a las líneas de vapor para mejorar la eficiencia en el proceso de peletizado en agribands purina de Guatemala S.A. (Tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0950\\_MI.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0950_MI.pdf)
22. Suarez, J. (2018). Desarrollo de un sistema de gestión de mantenimiento para reducir la presencia sistemática de fallas y paras imprevistas en equipos y maquinarias en la empresa productos AVON Ecuador (tesis de maestría). Escuela Politécnica Nacional de Quito, Ecuador. Recuperado de <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19318>
23. Vera, C. (2018). Diseño de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad RCM para el transformador de distribución de 250 kVA y sistema de distribución de baja tensión 380/220 V de la subestación de TECSUP - Arequipa (tesis de maestría). Universidad Católica de Santa María de Arequipa, Perú. Recuperado de [https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCSM\\_ce66cdbc3c138bfa21f7673dbcfda903](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCSM_ce66cdbc3c138bfa21f7673dbcfda903)

24. Villa, J. & Vernaza, V. (2020). Análisis de indicadores de confiabilidad para las centrales eléctricas de generación de EPM (Tesis de pregrado). Universidad de Antioquia de Medellín, Colombia. Recuperado de <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/18391>
  
25. Zapata, C. (2009). Diseño de un sistema de gestión de mantenimiento preventivo para los equipos de la planta HyL II en la Siderúrgica del Orinoco “Alfredo Maneiro” (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”, Venezuela.

## 13. APÉNDICES

### Apéndice 1. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. Matriz de coherencia

Objetivos	Variables	Indicadores	Técnicas e Instrumentos	Metodología
Determinar la situación actual de los equipos de instrumentación y control de la unidad de generación de ciclo binario.	Cualitativa	Fugas.	Técnica V.O.S.O.	Se enlistarán todos los elementos de instrumentación y control de la unidad de ciclo binario y se realizarán rutinas de inspección utilizando la técnica V.O.S.O. para determinar la situación actual de los equipos.
		Corrosión o incrustación.	<i>Formato de inspección.</i>	
		Vibraciones.	Análisis modal de fallos y efectos.	
		Recalentamiento.		
Identificar los pasos para desarrollar el plan de mantenimiento centrado en confiabilidad que deben de adaptarse a la planta geotérmica.	Cualitativa	Programación de mantenimientos	Análisis modal de fallos y efectos. <i>Formato AMFE.</i>	Se realizará un análisis modal de fallos y efectos de los equipos de instrumentación y control para determinar los elementos con mayor criticidad; y según el listado realizado con anterioridad, se ordenarán según su nivel de criticidad.
		Inventario de equipos.		
		Control de consumibles y repuestos.	Análisis de criticidad. <i>Formato de análisis de criticidad.</i>	Luego se identificarán los pasos del plan de mantenimiento adecuado tomando en cuenta los tiempos de ejecución y la criticidad de los equipos. Y se determinará el stock de los equipos necesarios a tener en bodega.
		Planes de mantenimiento predictivos y preventivos.	Inventario ABC.	
		Indicadores de mantenimiento.	<i>Clasificación de inventarios ABC.</i>	

Continuación apéndice 2.

<p>Evaluar los beneficios del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad desarrollado.</p>	<p>Cualitativa</p>	<p>Factibilidad</p>	<p>El gerente de planta evaluará la propuesta del mantenimiento centrado en confiabilidad y determinará si es factible o viable.</p>	<p>Se entrevistará al gerente de planta para determinar si el diseño del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad es factible o viable</p>
		<p>Viabilidad</p>		

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 3. Instrumento de revisión de equipos de instrumentación y control



Universidad de San Carlos de Guatemala  
 Facultad de Ingeniería  
 Escuela de Estudios de Postgrado  
 Maestría en Ingeniería de Mantenimiento

#### Lista de chequeo: Equipos de instrumentación y control

Realizado por: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_  
 Grupo: \_\_\_\_\_ Unidad: \_\_\_\_\_ Hora: \_\_\_\_\_

Instrucciones: Colocar en los espacios respectivos el nombre y TAG del equipo de instrumentación y control a revisar; en los parámetros colocar (S) si es satisfactorio, (I) si es insatisfactorio y (NA) si el parámetro no aplica al instrumento.

No.	TAG	Parámetro										
		Equipo	Temperatura	Vibración	Ruidos	Olor	Limpieza	Fugas	Conexión (proceso)	Cableado	Corrosión	Incrustación
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												

Continuación apéndice 3.

<b>OBSERVACIONES</b>		
<b>TAG</b>	<b>EQUIPO</b>	<b>Observación</b>

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 4. Instrumento de análisis modal de fallos y efectos (AMFE)



Universidad de San Carlos de Guatemala  
 Facultad de Ingeniería  
 Escuela de Estudios de Postgrado  
 Maestría en Ingeniería de Mantenimiento

### ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS

Realizado por: \_\_\_\_\_ Hoja No. \_\_\_\_\_  
 Unidad: \_\_\_\_\_ Proceso: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_  
 Descripción: \_\_\_\_\_

Instrucciones: Colocar en los espacios respectivos el nombre y TAG del equipo de instrumentación y control a analizar.

(D) Probabilidad de no detección.

(O) Probabilidad de ocurrencia.

(S) Gravedad o severidad del fallo

(NPR) Número de prioridad del fallo.

Nombre y TAG (1)	FALLA POTENCIAL			EVALUACIÓN				Tarea recomendada (9)	Frecuencia (10)
	Posibles fallas (2)	Modo de falla (3)	Efecto de falla (4)	D (5)	O (6)	S (7)	NPR=DxOxS (8)		

Fuente: elaboración propia.



## Apéndice 5. Instrumento de análisis de criticidad



Universidad de San Carlos de Guatemala  
 Facultad de Ingeniería  
 Escuela de Estudios de Postgrado  
 Maestría en Ingeniería de Mantenimiento

### ANÁLISIS DE CRITICIDAD

Realizado por: \_\_\_\_\_ Hoja No. \_\_\_\_\_  
 Unidad: \_\_\_\_\_ Proceso: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_  
 Descripción: \_\_\_\_\_

Instrucciones: Colocar en los espacios respectivos el nombre y TAG del equipo de instrumentación y control a analizar, así como el valor correspondiente según la matriz de criticidad.

EQUIPO	TAG	Frecuencia de falla (1)	Impacto en producción (0.3)	Costo de reparación (0.1)	Impacto de seguridad (0.3)	Impacto ambiental (0.3)	Valor de Criticidad	Criticidad del equipo

Fuente: elaboración propia.